

Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências

ESTIMATIVA DA HETEROGENEIDADE CONSTITUCIONAL DO
MINÉRIO FOSFÁTICO DA MINA DE TAPIRA, MG

Monografia de Trabalho de Formatura
(TF - 14/09)

Felipe Gustavo Brondani Rabelo

Orientadora: Prof Dr^a Lena Virgínia Soares Monteiro

Coorientadora: Prof. Dr^a Ana Carolina Chieregati

Supervisão Estágio: Thiago Hermógenes – Vale Fertilizantes

São Paulo
2014

TF
R114
FGB.e

Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências

DEDALUS - Acervo - IGC



30900032376

ESTIMATIVA DA HETEROGENEIDADE CONSTITUCIONAL DO
MINÉRIO FOSFÁTICO DA MINA DE TAPIRA, MG

Monografia de Trabalho de Formatura
(TF - 14/09)



Felipe Gustavo Brondani Rabelo

Orientadora: Prof Dr^a Lena Virgínia Soares Monteiro

Coorientadora: Prof. Dr^a Ana Carolina Chierigati

Supervisão Estágio: Thiago Hermógenes – Vale Fertilizantes

São Paulo
Novembro/2014

TF
R114
FGB.2

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Cláudio e Maria, por toda a educação, incentivo e apoio que me proporcionaram ao longo da vida. Em especial, agradeço ao meu pai, Cláudio, por toda a paciência, compreensão, orientação e estímulo que sempre me proporcionou. Também agradeço à minha mãe, Maria, por toda a dedicação e carinho que sempre me proporcionou. Agradeço também aos meus irmãos, Cláudio e Maria, por toda a compreensão e apoio que sempre me proporcionaram.

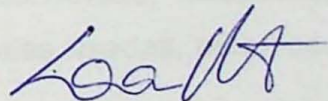
Agradeço à FAPESP pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho. Também agradeço ao Prof. Dr. Cláudio de Faria, orientador deste trabalho, por toda a orientação, incentivo e apoio que sempre me proporcionou. Agradeço também ao Prof. Dr. Cláudio de Faria, orientador deste trabalho, por toda a orientação, incentivo e apoio que sempre me proporcionou. Agradeço também ao Prof. Dr. Cláudio de Faria, orientador deste trabalho, por toda a orientação, incentivo e apoio que sempre me proporcionou.

Agradeço às minhas amigas, Prof. Dr. Lena Virgínia Soares Monteiro e Prof. Dr. Ana Carolina Chierigati, pelo apoio, incentivo, sugestões e por estarem sempre comigo neste momento. Agradeço também ao Prof. Dr. Cláudio de Faria, orientador deste trabalho, por toda a orientação, incentivo e apoio que sempre me proporcionou.

Quero também agradecer a todos os funcionários do Laboratório de Genética da USP, que sempre me proporcionaram todo o apoio e incentivo. Agradeço também a todos os funcionários do Laboratório de Genética da USP, que sempre me proporcionaram todo o apoio e incentivo. Agradeço também a todos os funcionários do Laboratório de Genética da USP, que sempre me proporcionaram todo o apoio e incentivo.

Por fim, agradeço também aos meus amigos, que sempre me proporcionaram todo o apoio e incentivo. Agradeço também aos meus amigos, que sempre me proporcionaram todo o apoio e incentivo. Agradeço também aos meus amigos, que sempre me proporcionaram todo o apoio e incentivo.

De acordo:



Prof. Dr^a Lena Virgínia Soares Monteiro:

Prof. Dr^a Ana Carolina Chierigati:

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço aos meus pais, Cláudia e Natival, por toda a atenção, formação e amor que me concederam até hoje. Ao meu irmão, Artur, por tudo que vivemos juntos, pelos conselhos, angústias e alegrias. À minha irmã Clarissa por tudo que representa para nossa família e para mim. E ao meu avô, Ilton, sempre tão presente em toda minha vida, e me apoiando em todas as decisões que tomei.

Agradeço a Vale Fertilizantes S.A pela oportunidade de estágio, permitindo-me aprender ainda mais, e a todos os funcionários que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado. Em especial, agradeço ao Geol. Thiago Hermógenes, à equipe do planejamento de curto prazo, e a todos do Galpão de Geologia que me auxiliaram na coleta e preparação das amostras.

Agradeço às minhas orientadoras, Prof^a Dr. Lena Virgínia Soares Monteiro e Prof^a Dr. Ana Carolina Chierigati pelo apoio, conselhos, sugestões, e por dividirem comigo conhecimento e sabedoria. Agradeço também ao Prof. Dr^o Jorge Silva Bettencourt pelos esclarecimentos extremamente relevantes.

Gostaria também de agradecer a todos os funcionários do Instituto de Geociências da USP que tornam este Instituto ainda mais eficiente e humano. Em especial agradeço a equipe da biblioteca: Sandrinha, Roger, Kátia, Érika, Neide, Estela; ao setor de estágio: Marlene; de pesquisa: Marilda; e às funcionárias da seção de graduação.

Por fim, agradeço também aos grandes amigos que a graduação me proporcionou. Frota, Orka, Érika muito obrigado pelas conversas, discussões e os cafés. Marcelha, Betty, Flávia, Bruna, Thiago obrigado pelas risadas, pelos campos e amizade.

Resumo

Conhecer o minério explotado é fundamental para garantir a produtividade de um empreendimento mineiro e, conseqüentemente, sua sustentabilidade, uma vez que a vida útil da mina é aumentada. Nesse cenário, a caracterização da denominada heterogeneidade constitucional de um minério é prática estratégica, permitindo avaliar protocolos de amostragem ou mesmo aperfeiçoá-los.

Este Trabalho de Formatura apresenta a caracterização da heterogeneidade constitucional do minério fosfático da Mina de Tapira, amostrado na Frente 2 ("Região da Bigorna"), considerando-se as variações das fácies e microfácies dessa porção do depósito. A partir desse resultado, foi executada avaliação dos procedimentos amostrais aplicados no planejamento de curto prazo da Mina de Tapira.

Os resultados finais indicam que o erro fundamental associado às etapas de preparação das amostras é relativamente baixo, e deve-se, principalmente às etapas de quarteamento primário (2,02%) e coleta primária de amostras (0,5%). Entretanto, a comparação entre os modelos de longo e curto prazo mostram uma baixa aderência entre eles, como provável consequência da amostragem do pó de perfuratriz adotada no modelamento de curto prazo. Nesse caso, a natureza do minério da Mina de Tapira, úmido e friável, possivelmente gera baixas taxas de recuperação por esse método, cujo emprego, sugere-se nesse estudo, que seja reavaliado.

Palavras chaves: amostragem, fosfato, erro fundamental, heterogeneidade constitucional

Abstract

It is critical to know the characteristics of the exploited ore to ensure the productivity of a mining company and hence its sustainability, as the mine life is increased. In this scenario, the characterization of the ore constitutional heterogeneity is a strategic procedure, which allows evaluating or even optimizing sampling protocol.

This Undergraduation Project aims to estimate the constitutional heterogeneity of the phosphatic ore from the Tapira Mine (sampled from the Frente 2, "Bigorna Region"), considering the facies and microfacies variations in this deposit portion. Evaluation of the sampling procedures applied in the short-term planning of the Tapira Mine was performed based on these results.

The concluding results have shown that the fundamental error associated with sampling stages is relatively low, and is due mainly to the primary quartering (2.02%) and primary sampling (0.5 %). However, the comparison between short- and long-term mining models show low adherence, indicating problems related to dust sample drilling. In fact, the problems relative to the using of sample dust in the Tapira Mine is probably a consequence from the moist and friable nature of the Tapira ore. Thus, this study suggests that the use of dust samples in short-term models might be reassessed.

Key words: sampling, phosphate resources, fundamental error, constitutional heterogeneity

De acordo:

Prof Dr^a Lena Virgínia Soares Monteiro:

Prof. Dr^a Ana Carolina Chieregati:

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	3
3. OBJETIVOS	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1. Complexo Mineral de Tapira	5
4.1.1. Histórico	5
4.1.2. Contexto Geológico Regional	5
4.1.3. Geologia Local	9
4.2. Intemperismo e Mineralizações Ultramáficas Alcalinas-Carbonatíticas	15
4.3. Fundamentos de Estatística	18
4.3.1. Variáveis Aleatórias e Probabilidades	18
4.3.1.1. Conceituação de Variável Aleatória	18
4.3.1.2. Distribuição de Probabilidades	18
4.3.2. Medidas de Tendência Central	20
4.3.3. Medidas de Dispersão	20
4.4. Fundamentos de Amostragem	21
4.4.1. Heterogeneidade Constitucional (CHI)	22
4.4.2. Fator Constante de Heterogeneidade Constitucional (IHL)	23
4.4.3. Cálculo Direto do IHL	25
4.4.3.1. Fator Forma (<i>f</i>)	25
4.4.3.2. Fator Granulometria (<i>g</i>)	25
4.4.3.3. Fator Diâmetro (<i>d</i>)	26
4.4.3.4. Fator Mineralogia (<i>c</i>)	26
4.4.3.5. Fator Grau de Liberação (<i>l</i>)	26
4.4.4. Cálculo Indireto do IHL	27
4.4.5. Erro Fundamental	28
4.4.6. Amostragem de curto prazo	29
5. MATERIAIS E MÉTODOS	31
5.1. Coleta das amostras	31
5.2. Preparação das Amostras	33
5.3. Teste de Heterogeneidade – Metodologia Indireta	34
6. RESULTADOS	35
6.1. Gráficos de Deriva (curto prazo x longo prazo)	35

6.2.	<i>Fator IHI pela metodologia indireta.....</i>	37
6.3.	<i>Avaliação do Atual Protocolo Amostral do curto prazo</i>	40
6.4.	<i>Comparação entre o fator IHL para outras tipologias de minérios</i>	41
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	42
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

A coleta de amostras a partir de um universo representa uma prática muito comum nas mais diversas áreas, sejam ciências sociais, biológicas ou mesmo na mineração. O seu emprego visa fornecer o conhecimento de determinadas características de uma dada população através da análise de uma ou mais partes dessa, contornando limitações de natureza ética, econômica ou física (Magalhães & Lima 2002).

Em particular, na indústria mineira a amostragem revela-se de extrema necessidade tanto para a fase de exploração quanto para a fase de exploração (Alwyn & Annels 1991). Na etapa de exploração, a tomada de amostras visa ao conhecimento de parâmetros do minério e seus resultados aplicam-se tanto ao planejamento de longo prazo, quanto para os de médio e curto prazo. O rigor relativo às boas práticas de amostragem na indústria mineira é, portanto, de grande importância a fim de garantir amostras representativas, ou seja, amostras acuradas e precisas (Gy, 1998) destinadas a programas de avaliação e controle de qualidade. Neste sentido, a teoria proposta por Pierre Gy (1998) edifica-se com solidez, abrangendo as mais diversas facetas envolvidas na amostragem de materiais particulados, inclusive a compreensão de como os erros são gerados, quais as maneiras de minimizá-los ou mesmo reduzi-los e como estimá-los (Pitard, 1993).

Em um processo de amostragem mineral, distintas categorias de erros são geradas, incluindo os de preparação e os analíticos. Os erros de preparação (PE) são acidentais e não permitem estudos estatísticos. Os erros analíticos podem ser de dois tipos: os sistemáticos (média diferente de zero e variância igual à zero) e aleatórios (média igual a zero e variância diferente de zero). Entretanto, a distinção entre essas duas categorias é apenas uma conveniência, pois ambos os erros podem ser considerados variáveis aleatórias (Chierigati, 2007), ou seja, o seu resultado é dependente da realização de um experimento (Yamamoto, 2001). Estes erros somados resultam no denominado erro de amostragem ou erro total (TE), que representa a variância total da amostragem e resulta da somatória das diversas fontes de erros.

De todos os erros passíveis de ocorrerem na amostragem mineral, o denominado Erro Fundamental (FE), relativo à heterogeneidade de constituição do minério, é o único que não pode ser eliminado, mesmo quando as condições de amostragem são ideais (Minnitt et al., 2007). Apesar disto, este erro pode ser previsto

e também reduzido desde que se conheça a heterogeneidade relacionada à população, que é resultante de fatores intrínsecos ao minério, tais como a sua mineralogia, teor, forma dos grãos, granulometria, grau de liberação, entre outros (Gy, 1998).

Desta maneira, esse estudo apresenta resultados relativos ao minério apatítico de Tapira no que concerne à sua heterogeneidade constitucional. Tais estudos são de grande importância, uma vez que podem contribuir significativamente para análises quantitativas dos erros associados às práticas amostrais para esse minério, e, eventualmente, garantir otimizações dos procedimentos de amostragem.

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área vinculada a este estudo localiza-se no município de Tapira, região sudoeste do Estado de Minas Gerais, distando aproximadamente 35 km da cidade de Araxá e 350 km da capital do estado, Belo Horizonte. Em particular, o presente projeto direciona-se à porção norte do Complexo Ultramáfico-Alcalino-Carbonatítico de Tapira (Soubiés *et al.*, 1991).

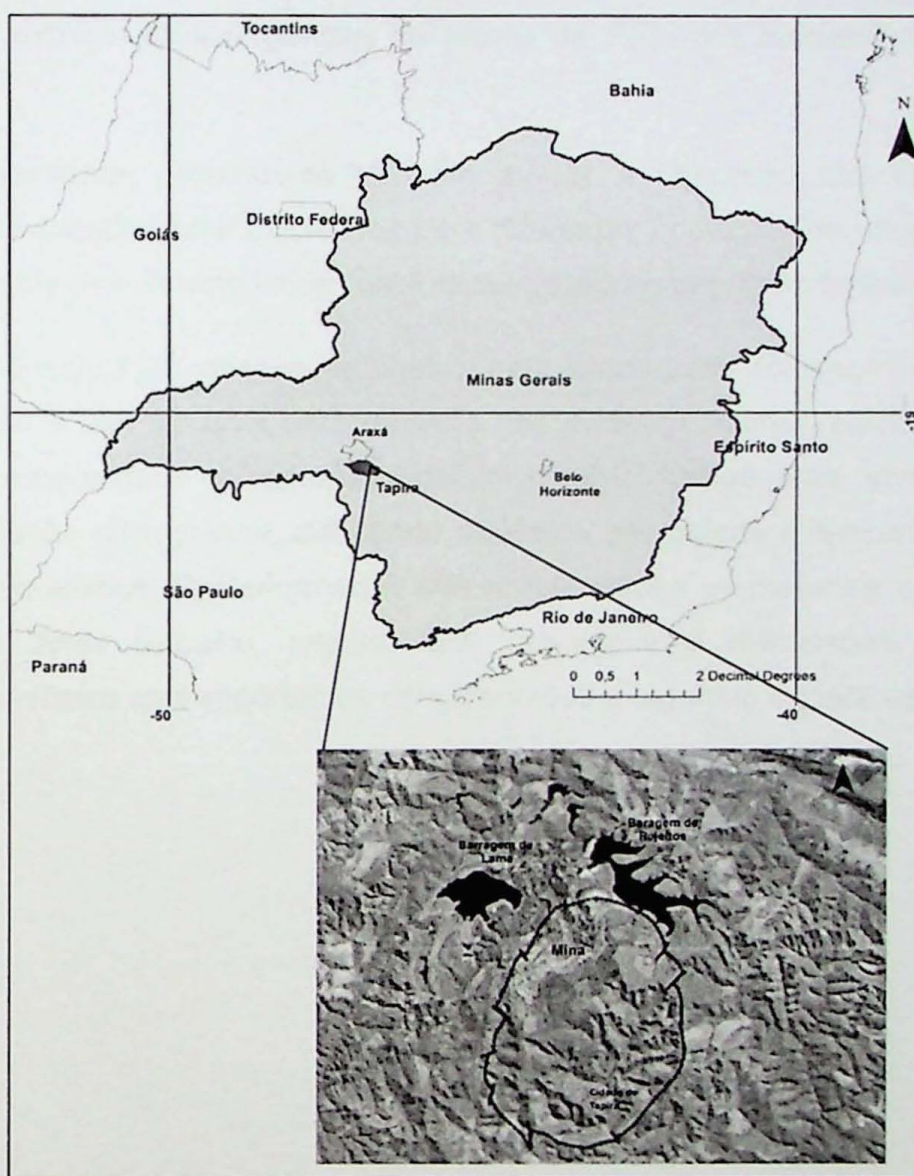


Figura 1. Localização do município de Tapira e da Mina de Fosfato Tapira operada pela Vale Fertilizantes S.A (imagem do satélite Landsat).

3. OBJETIVOS

Esse Trabalho de Formatura visa primordialmente o cálculo da Heterogeneidade Constitucional associada ao minério apatítico da Mina de Tapira, proveniente da região denominada Frente 2 ("Bigorna"), através da técnica denominada Teste de Heterogeneidade – Metodologia Indireta. A partir do cálculo da Heterogeneidade Constitucional, esse estudo também visa à estimativa do erro fundamental associado às etapas do atual protocolo de curto prazo, que pode, eventualmente, explicar as divergências de teores de P_2O_5 dos modelos de curto e longo prazo.

Adicionalmente, pretende-se também avaliar a utilização dos valores de heterogeneidade constitucional calculados para diferentes tipologias de minério como indicativos indiretos das características geológicas gerais de um dado depósito.

Para consolidação dessas propostas esta monografia foi segmentada em tópicos, de modo a permitir uma compreensão dos diversos fatores relacionados ao cálculo da heterogeneidade constitucional de um minério. Inicialmente, apresenta-se uma fundamentação bibliográfica, discutindo aspectos geológicos e fundamentos de amostragem e estatística. Posteriormente, são apresentados os materiais e métodos para execução deste trabalho, seguido dos resultados e discussões. Por fim, apresenta-se um tópico com importantes considerações e algumas sugestões.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Complexo Mineral de Tapira

4.1.1. Histórico

As primeiras considerações a cerca do que hoje é denominado de Complexo Ultramáfico-Alcalino-Carbonatítico de Tapira remetem à década de 1920, como mencionado por Leonardos (1956) em relatório técnico do DNPM. De acordo com esse autor, um papel de precursor é atribuído a J. F de Andrade que identificou a presença de titano-magnetita com perovskita na região (Leonardos, 1956).

Também por volta de 1956, o DNPM iniciou atividades exploratórias na região, com o intuito, a princípio, de verificar possíveis ocorrências de manganês. Os trabalhos exploratórios resultaram na verificação de ocorrências de nióbio e também titânio, associados, respectivamente, à presença de pirocloro e perovskita, ilmenita e titano-magnetita (Alves, 1960). A presença de apatita também foi descrita nas rochas deste complexo. Posteriormente, em 1966, o DNPM novamente aplicou esforços para a caracterização detalhada da mineralogia do complexo, assim como para mensurar a extensão de uma possível jazida. Como resultado, conclui-se que a região era extremamente enriquecida em titânio e fosfato, e que a atuação dos processos intempéricos sobre o 'protominério' foram determinantes para a geração do depósito de titânio e fosfato (Grossi Sad & Torres, 1976).

Apenas na década de 1970 foram iniciadas as atividades de exploração dos recursos fosfáticos deste complexo, inicialmente, sob responsabilidade da denominada Nitrofertil e Ultrafertil. Em 1977, foi criada a estatal Fosfertil, que no ano de 1980 passa assumir a mineração de fosfato na região de Tapira. No ano de 1992, a Fosfertil é então privatizada, passando a ter parcelas incorporadas por diferentes acionários (Bunge, Fertifos, dentre outros). No ano de 2010, a empresa Vale S.A executou a compra de 100% dos ativos pertencentes à Bunge Fertilizantes e passou a ter controle de mais de 40% das ações da Fosfertil. Logo depois, a Vale S.A assumiu o controle de grande parte dos ativos restantes da Fosfertil e, hoje, detêm grande parte dos ativos relacionados à Mina de Tapira.

4.1.2. Contexto Geológico Regional

O Complexo Ultramáfico-Alcalino-Carbonatítico de Tapira é intrusivo nas rochas metamórficas do Grupo Canastra. Esse grupo se insere na Faixa Brasília, neoproterozóica, e é constituído por rochas metassedimentares psamíticas e pelíticas, com predominância de quartzitos e filitos e ocorrências de metacalcários intercalados

(Brod, 1990). Na região de Tapira, este grupo se expressa predominantemente como quartzitos.

A intrusão de Tapira associa-se ao grande evento magmático relacionado com a quebra do Supercontinente Gondwana (Gibson *et al.*, 1995, Gibson *et al.*, 1997), que ocorreu do Eocretáceo ao Eoceno. Autores como Wooley (1987) e Brod *et al.* (2000) descrevem a intrusão de Tapira como uma das diversas intrusões alcalinas resultantes dessa quebra, e que hoje formam as províncias alcalinas que bordejam a Bacia do Paraná (Figura 2).



Figura 2. Províncias Alcalinas Eocretáceas-Eocênicas, que incluem as províncias ao norte, neocretáceas, as províncias ao sul, com idades entre o Eocretáceo e Neocretáceo e a província oriental (Província Serra do Mar) com idades mais recentes, do Neocretáceo ao Eoceno (Brod *et al.*, 2000).

Em termos geográficos essas províncias alcalinas podem ser subdivididas em três grupos: as províncias setentrionais, tais como as províncias de Poxoreú, Goiás e Alto Paranaíba, as províncias meridionais, que incluem as províncias Paraguai-

Oriental, Ponta Grossa, Lages-Anitápolis e Piratini e a província oriental, Serra do Mar (Figura 2).

A Província Alto do Parnaíba (APIP) abrange complexos alcalinos carbonatíticos que possuem uma estruturação geral NW-SE e formam um alto estrutural que separa a Bacia do Paraná e a Bacia San-Franciscana (Cruz & Cheney, 1976, Brod *et al.*, 2000, Cordeiro *et al.*, 2011). Sua origem é atribuída ao impacto inicial da denominada pluma de Trindade (Gibson *et al.*, 1995, Brod, 1990). De acordo com Gibson *et al.* (1995), o afinamento crustal teria sido importante para a despressurização do manto, favorecendo sua ascensão e consequente fusão.

Esta ascensão mantélica também permitiu que o calor, antes concentrado no manto, fosse dissipado através de convecção e advecção, resultando em fusão da própria crosta continental (Gibson *et al.*, 1995, Gibson *et al.*, 1997, Thompson *et al.*, 1998), que é composicionalmente mais enriquecida em potássio. Como resposta a estes eventos ocorreu intenso magmatismo alcalino, máfico-ultramáfico e ultrapotássico, tanto intrusivo, formando diques, condutos e complexos plutônicos, como extrusivo (Brod, 1990, Brod *et al.*, 2004).

As características petrogenéticas desta província definem uma associação kamafugítica-carbonatítica, sendo que, provavelmente, consideráveis volumes de magmas correlatos ao magmatismo carbonatítico encontrar-se-iam em subsuperfície (Brod, 1990, Gibson *et al.*, 1995, Cordeiro *et al.*, 2011). Em relação às séries petrogenéticas com ocorrência nesta província, incluem-se as séries bebedouríticas, foscoríticas, além de carbonatitos, mas que estão relacionadas aos processos de diferenciação magmática a partir dos magmas com afinidade kamafugítica (Brod, 1990). Em alguns casos, a interação com fluidos e processos metassomáticos alcalinos nas rochas máficas-ultramáficas desses complexos geraram intenso processo de flogopitização (Cordeiro *et al.*, 2011). Assim, Brod *et al.* (2000) consideram difícil a definição da origem das rochas ricas em flogopita, identificadas nesses complexos, que poderia ser tanto ígnea quanto metassomática e por isso aconselham o uso do termo flogopitito para denominá-las, que seria mais descritivo do que genético. Dessa forma, termos como glimerito e foscorito seriam reservadas a rochas ricas em flogopita com comprovada origem ígnea.

Os complexos representantes da APIP são Catalão I e II, Serra Negra em Goiás, e Salitre I, II e III, Araxá e Tapira no oeste de Minas Gerais. Esses complexos apresentam formato aproximadamente elipsoidal, com extensões de até 65 km² (Figura 3). Desde a segunda metade do século passado configuram-se como regiões alvo de estudos geológicos e metalogenéticos a partir de parcerias entre empresas do ramo mineiro e centros de pesquisa, devido principalmente à importância econômica

dos complexos alcalinos-carbonatíticos como hospedeiros de depósitos de Fosfato (Catalão I e II, Tapira, Araxá e Salitre), Titânio (Serra Negra, Salitre, Tapira e Catalão I), Nióbio (Araxá, Catalão), Elementos Terras Raras - ETR (Catalão) e outros bens minerais, tais como vermiculita, magnetita, barita.

Em relação a esses depósitos minerais há diversos fatores que controlam as características das mineralizações alcalino-carbonatíticas. Podendo ser divididos três principais: 1) controles regionais e geotectônicos, 2) controles locais primários e 3) controles locais secundários.

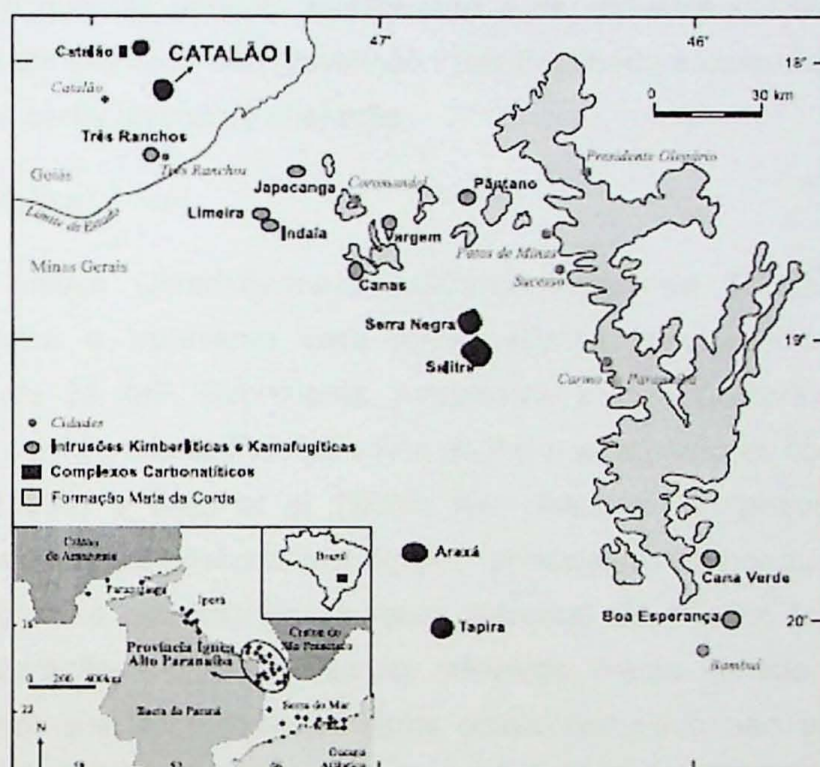


Figura 3. Localização das principais intrusões ultramáficas-alcalinas-carbonatíticas pertencentes à Província Alto do Paranaíba (Azzone & Ruberti, 2010; modificado a partir de Gibson *et al.*, 1995; Meyer *et al.*, 1994).

Os controles regionais enfatizam a provincialidade das ocorrências alcalinas, com intrusões relacionadas tanto espacialmente como temporalmente. Além disso, considera-se a reativação de estruturas do embasamento como relevante para a formação de um "trend" regional para as intrusões. Os controles locais primários são determinantes na geração de rochas ígneas enriquecidas ou não em um dado bem mineral, pois são os processos de cristalização fracionada, mistura de magmas, enriquecimento por contaminação magmática, dentre outros, que conduzirão a cristalização de rochas contendo concentrações abundantes de um dado elemento ou mineral.

Entretanto, em muitos casos os controles locais secundários revelam-se como mecanismos decisivos na geração do depósito mineral, uma vez que os processos supergênicos levam a concentrações residuais mais viáveis do ponto vista econômico. Os complexos alcalinos de Catalão I e II, Araxá e Tapira são exemplos de depósitos nos quais o aproveitamento faz-se através da extração do perfil regolítico (laterita). Todavia, a exaustão dessas jazidas supérgenas deverá conduzir as empresas responsáveis pela atual exploração ao desenvolvimento tecnológico a fim de garantir uma recuperação economicamente viável das rochas primárias.

Dado o que até aqui foi apresentado é de conveniência expressar que no tópico 4.2 será apresentada uma descrição mais detalhada a despeito dos complexos alcalinos e seus perfis típicos de alteração.

4.1.3. Geologia Local

O Complexo Ultramáfico-Alcalino-Carbonatítico de Tapira localiza-se na cidade homônima e apresenta uma forma elíptica, envolvendo uma área de aproximadamente 35 km². Representa, juntamente com o Complexo de Araxá, as intrusões mais meridionais da Província Alto do Paranaíba. Autores como Gibson *et al.* (1995), Brod (1990) e Brod *et al.* (2000) têm desenvolvido pesquisas visando à compreensão das características geológicas, principalmente no que concerne aos aspectos litológicos e petrológicos da rocha 'parental' do minério fosfático, ou seja, aquela cuja alteração supérgena não foi relevante. Neste sentido, estes mesmos autores verificam que as rochas primárias desse complexo não apresentam forte componente sódico, ou seja, não pertencem à série ijolítica (jacupiranguito-melteigito-ijolito-urtito) com nefelina e clinopiroxênio essenciais. Por sua vez, essas rochas são associadas a magmatismo ultrapotássico, como o da associação carbonatito-kamafugito (Brod *et al.*, 2000), o que é recorrente em todos os complexos pertencentes a Província do Alto Paranaíba. Em geral, no Complexo de Tapira há dominância de rochas ultramáficas alcalinas, que incluem clinopiroxenito e bebedourito, com quantidades subordinadas de rochas carbonatíticas, dunitos, flogopititos, melilitolito e flogopita picrito que, em geral, encontram-se como veios ou associadas a brechas magmáticas, além de ocorrências de sienitos (Cruz & Cheney, 1976; Brod *et al.* 2000).

Essas rochas ígneas são pertencentes às séries magmáticas bebedouríticas, foscóriticas, além da série carbonatítica, e estão associadas a processos de diferenciação, cristalização fracionada e/ou imiscibilidade de líquidos a partir de magmas primitivos kamafugíticos (Gibson *et al.*, 1995, Brod, 1990). Em particular, as

rochas abrangidas pelas séries bebedouríticas e foscoríticas são representadas por clino-piroxenitos diversos, além de dunitos, peridotitos, traquitos, lamprófiros e sienitos, e, geralmente, são enriquecidas em apatita, com exceção dos sienitos (Brod *et al.*, 2000, Brod, 1990, Grossi Sad & Torres, 1971).

Os 'bebedouritos' representam rochas com variação mineralógica modal de diopsídio, olivina, perovskita, magnetita e apatita (Brod *et al.*, 2000), podendo conter também percentagens variadas de flogopita. Esta classificação baseia-se no diagrama ternário (Figura 4), onde cada vértice corresponde a esses minerais, ou associações desses. No caso do Complexo de Tapira, as rochas bebedouríticas apresentam predominância de diopsídio/olivina, concentrando-se próximo ao vértice superior do diagrama, e subdividem-se em duas séries, denominadas de B1 e B2 (Brod, 1990, Brod *et al.*, 2000).

Os denominados foscoritos são rochas nas quais além do enriquecimento potássico, há enriquecimento sódico (Brod, 1990, Brod *et al.*, 2004). Essa série abrange rochas derivadas da cristalização de magmas enriquecidos em fosfato, e para sua classificação modal contabilizam-se os minerais olivina, apatita e magnetita (Yegorov, 1993; Figura 5). A classificação da série foscorítica é mais antiga que a da série bebedourítica (Brod *et al.*, 2004) e encontra-se bastante consolidada entre os pesquisadores dedicados ao estudo dessas rochas.

No caso do Complexo de Tapira os afloramentos de rochas sãs são raros, e o acesso a este material deve-se principalmente a testemunhos de sondagem e porções mais profundas da cava. O manto laterítico ultrapassa muitas vezes a profundidade de 30-60 metros. Em função disto, Brod (1990) propõe um mapa geológico baseado na descrição de testemunhos de sondagem e nas rochas expostas nos bancos mais fundos (Figura 6). Este mapa apresenta a distribuição das rochas das séries magmáticas observadas neste complexo. Trata-se, portanto, de um mapa geológico direcionado essencialmente para a configuração dos 'protólitos' do minério fosfático, e, portanto, não inclui os diversos produtos do intemperismo superposto sobre as rochas deste complexo.

Uma breve descrição, concernente às variedades petrológicas do Complexo Tapira é aqui apresentada com base nos trabalhos de Cruz & Cheney (1976), Brod (1990), Brod *et al.* (2000) e Brod *et al.* (2004).

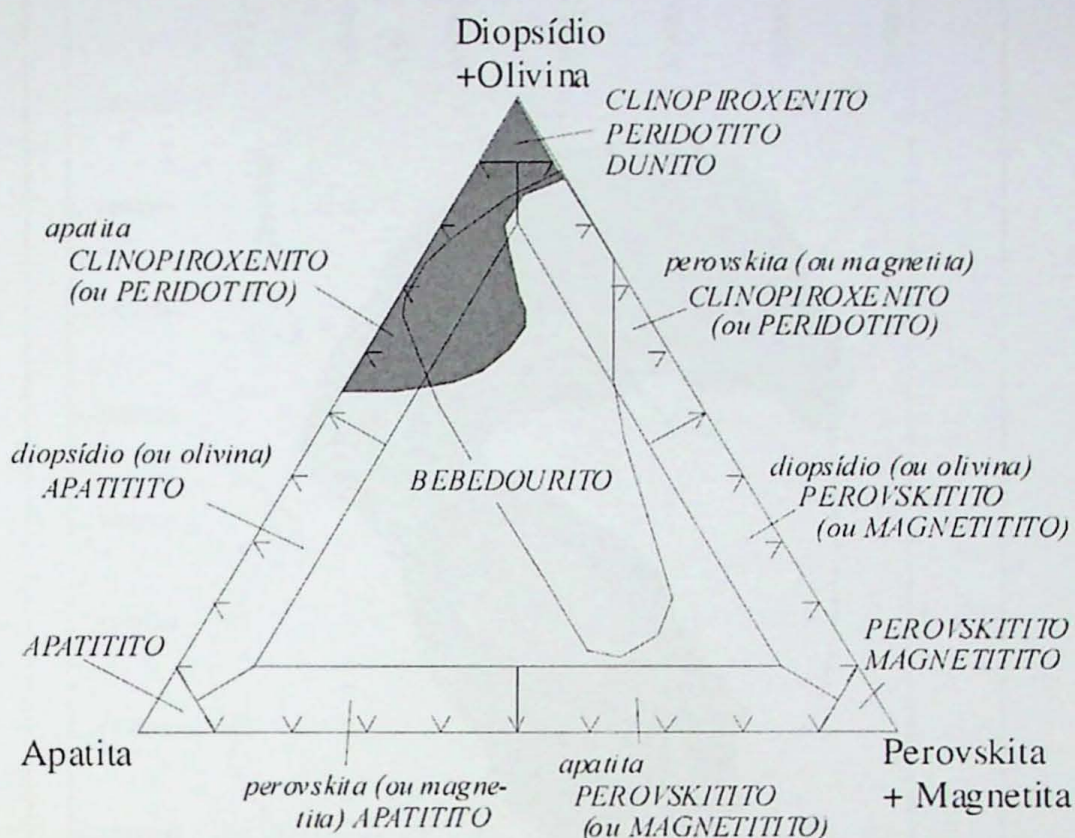


Figura 4. Classificação proposta por Brod *et al.* (2000) para as rochas da série bebedourítica. As regiões assinaladas, área acinzentada e porção apenas circundada, referem-se aos componentes desta série descritos no Complexo Tapira (Brod *et al.*, 2004).

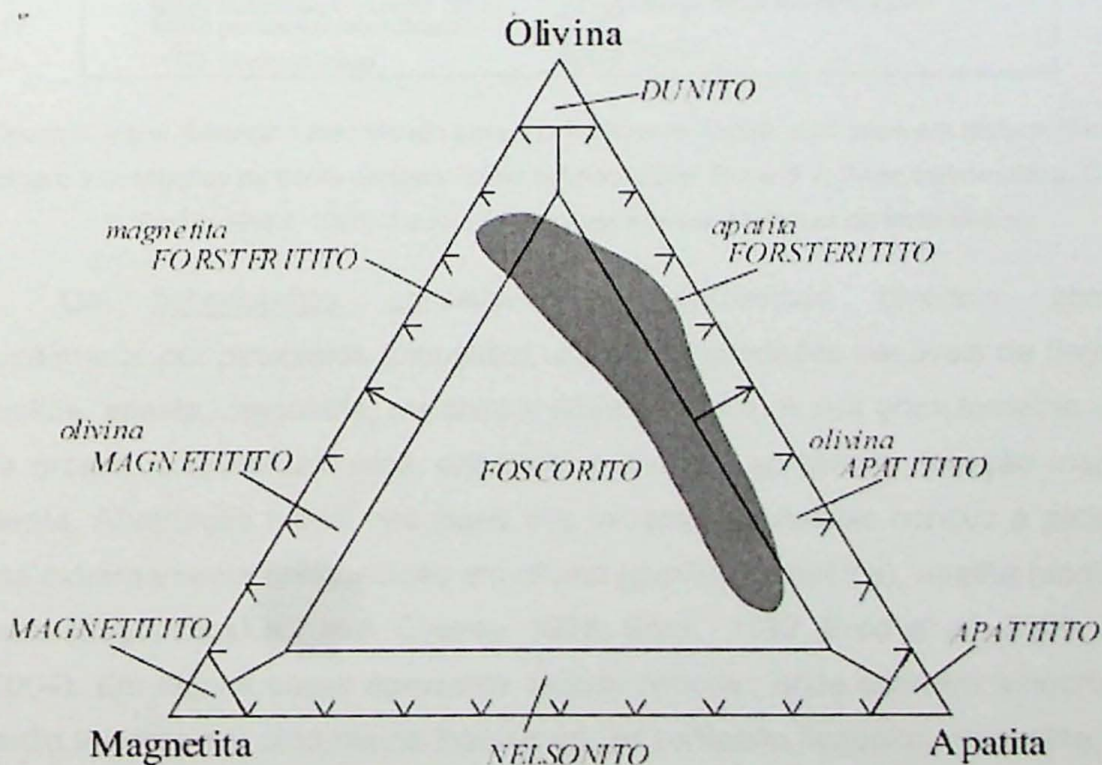


Figura 5. Classificação modal para as rochas da série foscoritica (Brod *et al.* 2004).

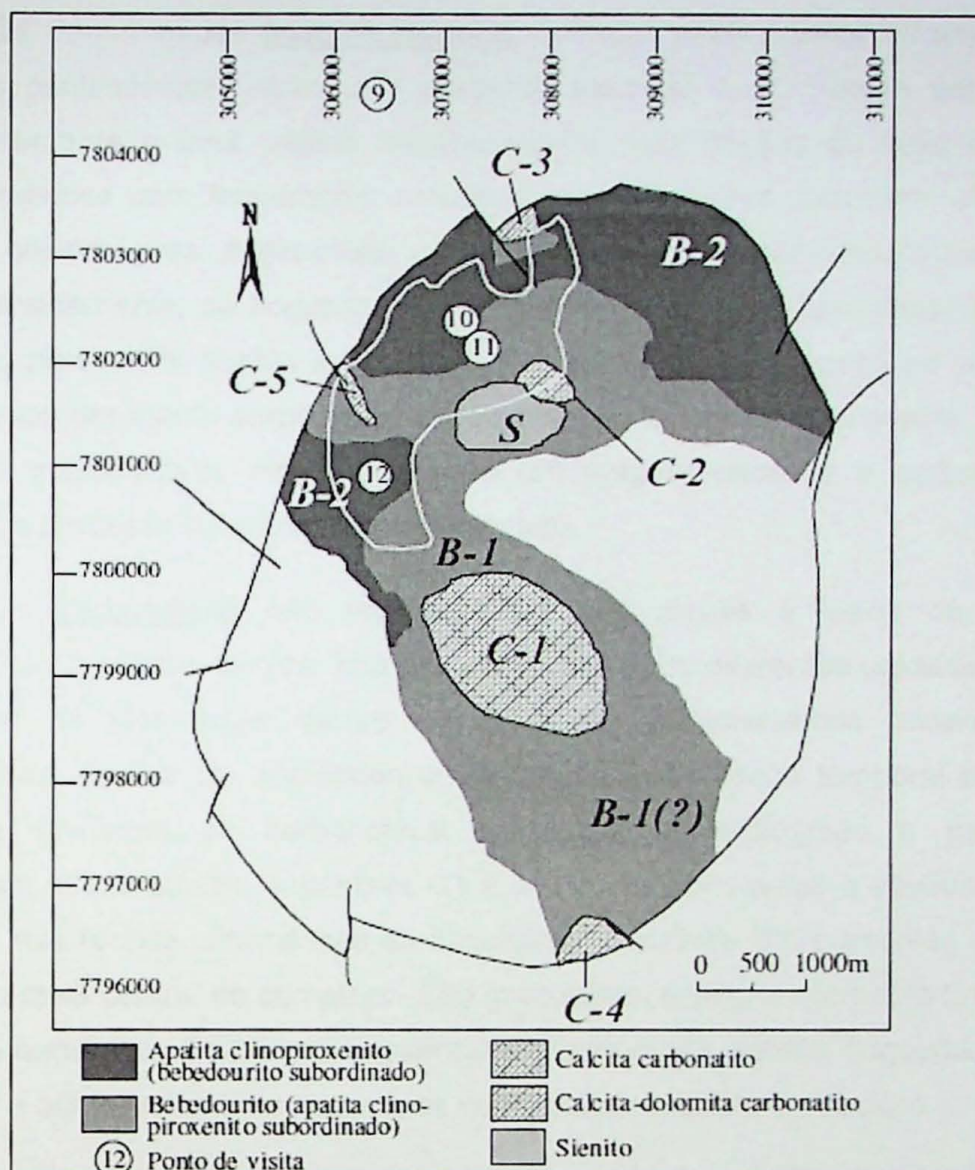


Figura 6. Mapa Geológico simplificado para o complexo de Tapira, com base em testemunhos de sondagem e descrições da frente de lava. Série bebedourítica: B-1 e B-2; Série carbonatítica: C1 a C-5, S: Sienito (Brod, 1990). Descrições das variedades litológicas no texto abaixo.

Os bebedouritos consistem em piroxenitos diversos compostos principalmente por piroxênios (diopsídio), olivina, quantidades variáveis de flogopita, e perovskita, apatita, magnetita, melanita e titanita cálcica. A sua granulometria varia de fina a grossa, a, eventualmente, pegmatítica. Podem apresentar foliação magmática incipiente. A variação modal nas fases dos minerais essenciais conduz a geração de rochas extremamente enriquecidas em olivina (dunitos, wehrlitos), apatita (apatititos) e flogopita (flogopititos) (Cruz & Cheney, 1976, Brod, 1990, Brod *et al.*, 2000, Brod *et al.*, 2004). Em alguns casos apresenta textura bimodal, onde ocorrem fenocristais de diopsídio imersos em uma matriz inequigranular contendo flogopita, magnetita, apatita dentre outros minerais.

Os denominados flogopitos-picritos correspondem a veios ultramáficos com tamanhos centimétricos, raramente atingindo mais de 1 m. Podem ser atribuídos equivocadamente a uma origem metassomática, mas feições de fluxo magmático, textura porfirítica com fenocristais euhédricos, dentre outras, permitem classificá-los como de origem ígnea. Apresentam uma mineralogia dada por fenocristais de olivina e, subordinadamente, de flogopita, ocorrendo em uma matriz com flogopita, cromita, magnetita, perovskita, apatita e carbonato. Em seção delgada é possível observar em alguns casos um manto carbonático envolvendo os fenocristais de olivina, importante indício da imiscibilidade magmática entre um magma silicático e carbonatítico no decorrer do processo de cristalização fracionada.

Os carbonatitos são representados por diques e veios de tamanhos centimétricos a poucos metros. São agrupados em cinco diferentes unidades, C1 a C5 com base na localização dentro do complexo, características mineralógicas e petrográficas. Apesar da dificuldade em estabelecer a relação temporal entre essas diferentes unidades de carbonatitos, evidências mineralógicas e petrográficas possibilitam diferenciá-las. A unidade C1 é composta por sövitos e sövitos-dolomitos, intrusivos nas rochas ultramáficas da denominada unidade B1, presentes geralmente na porção mais central do complexo. São granulares, com granulometria fina a média, por vezes bandadas. Os minerais essenciais são dolomita, calcita, flogopita, magnetita e apatita, e ocorrem também acessórios como sulfetos, barita e pirocloro.

Os carbonatitos da unidade C2 estão presentes em considerável volume na região central-norte do complexo, associados à sienitos, mas ocorrem em outras porções do depósito como diques e brechas carbonáticas. São mais finos que os carbonatitos C1, e dominados mineralogicamente por calcita/dolomita. Essas rochas contêm magnetita como acessório e, mais raramente, flogopita, barita e pirocloro. A unidade C3 ocorre no extremo norte do complexo e intrude bebedouritos das unidades B1 e B2. Consiste de um carbonatito isótropo, granular, médio a grosso, dominado por calcita, com cristais subordinados de apatita, e presença de xenocristais de diopsídio e magnetita. A unidade C4 é mineralogicamente e petrograficamente semelhante à unidade C3, entretanto xenocristais de diopsídio estão ausentes. Além disso, essa unidade ocorre na porção mais ao sul do complexo. A unidade C5 corresponde a um conjunto de diques recorrentes em diversas regiões, mas com expressiva presença na porção nordeste do complexo (ver Figura 6), são granulares, dominados por dolomita/calcita, apatita e xenocristais de flogopita ocorrem limitadamente.

Ainda que as rochas máficas, ultramáficas e alcalinas sejam enriquecidas em apatita magmática, a gênese do depósito de Tapira vincula-se intimamente com os processos intempéricos (Cruz & Cheney, 1976). Esses conduziram ao enriquecimento ainda maior em apatita – mineral resistato, e também em anatásio – resultante da alteração da perovskita, ilmenita e titanomagnetita. A partir de critérios principalmente geoquímicos/químicos, o perfil laterítico de Tapira foi segmentado em zonas aproximadamente horizontalizadas. Essas zonas incluem, do topo para a base: zona estéril, zona de mineralização de titânio, zona de mineralização de fosfato com titânio, zona de mineralização de fosfato apenas, e rocha estéril pouco mineralizada. Levando-se também em conta a rocha sã, é plausível a separação dessas zonas em zona estéril, zona de minério e rocha sã (Figura 7).



Figura 7. Perfil da zona mineralizada do Complexo de Tapira, mostrando a discriminação em distintas zonas geoquímicas, incluindo as mineralizadas em fosfato e titânio (Vale Fertilizantes, 2013).

Esse zoneamento do depósito configura-se como uma simplificação baseada em dados essencialmente geoquímicos, e com poucas considerações a despeito da evolução do perfil regolítico em termos mineralógicos e petrográficos. Isto pode vincular-se a uma escassez de dados na literatura com relação a estudos mais detalhados sobre evolução do perfil laterítico de Tapira. Alguns trabalhos relativos a essa evolução são os de Soubiés *et al.* (1991) e Vieira (1997). Entretanto, as discussões já promovidas por estes autores podem ser ampliadas a partir de analogias com outros depósitos carbonatíticos alcalinos no Brasil, sujeitos a condições análogas de intemperismo tropical. Dado isto, o tópico 4.2, abaixo, objetiva apresentar uma revisão a esse respeito.

4.2. Intemperismo e Mineralizações Ultramáficas Alcalinas-Carbonatíticas

A evolução dos depósitos minerais supérgenos é reflexo das condições climáticas às quais a rocha mãe está sujeita, além das características químicas e mineralógicas desta rocha protólito. O perfil clássico de intemperismo (Figura 8) é formado do topo para base por um horizonte de solo, onde se concentra material orgânico e argilominerais; uma zona laterítica e bauxítica; um horizonte saprolítico e a rocha inalterada, ou rocha mãe. Podem ocorrer também silcretes intercalados e descontínuos no perfil, que são porções silificadas por fluidos intempéricos (Morteani & Preinfalk, 1996).

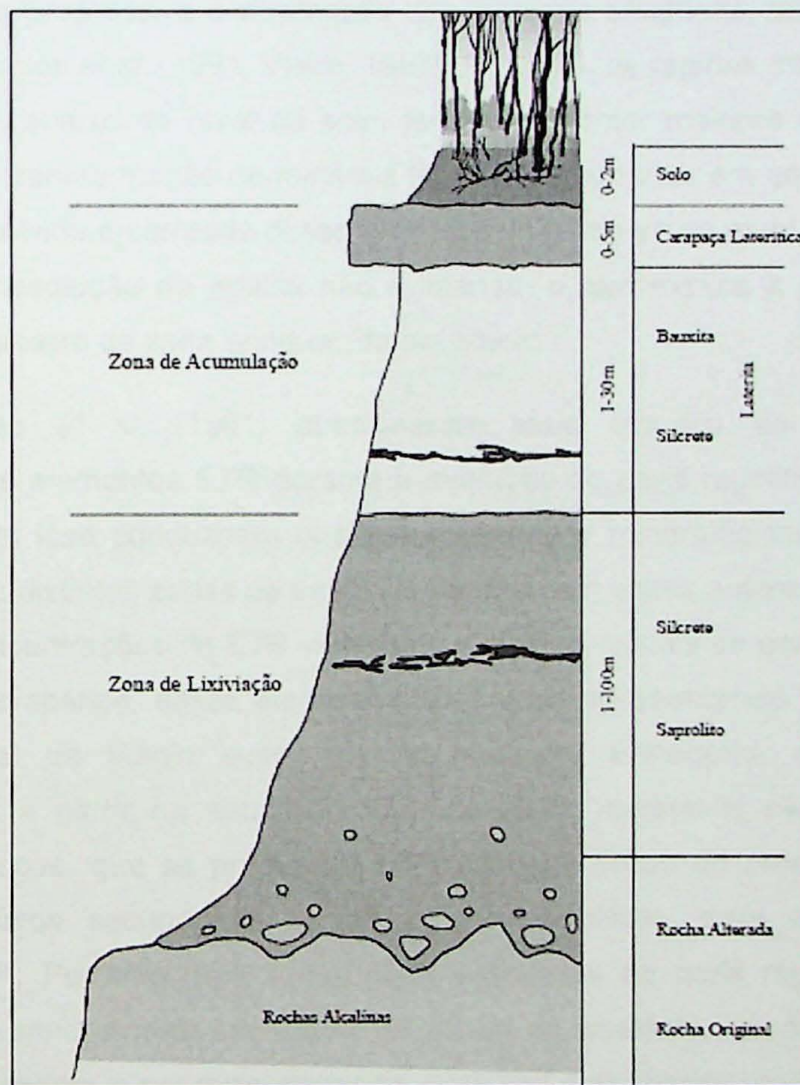


Figura 8. Divisões propostas para um perfil de intemperismo. Trata-se de um modelo idealizado, por isso alguns perfis podem não apresentar necessariamente todas as zonas (Morteani & Preinfalk, 1996).

Neste contexto, os alteritos titaníferos e fosfáticos do depósito de Tapira são resultados da evolução de um perfil intempérico a partir de rochas máficas-ultramáficas, alcalinas e carbonatíticas sobre condições de intemperismo tropical. Soubiés *et al.* (1991) atribuem a sua consolidação a processos recorrentes no

Terciário e Quaternário, e que não promoveram erosão mecânica, mas apenas alterações de caráter hidrolítico, concentrando em níveis do regolito, em particular nas zonas lateríticas e saprolíticas, elementos de baixa mobilidade (Ti, Nb, P, ETR, Al, Fe dentre outros).

No Complexo de Tapira, a evolução progressiva do perfil regolítico segue um percurso, a partir da rocha mãe até a zona laterítica, caracterizado por transformação progressiva da perovskita em anatásio; dissolução progressiva da apatita, que é reprecipitada na forma de fosfatos secundários (fosfatos do grupo do rabdofânio e crandallita); geração mais acentuada de oxi-hidróxidos de ferro a partir da magnetita; vermiculitização progressiva e eliminação dos minerais silicáticos, tais como olivina e piroxênios (Soubiés *et al.*, 1991, Vieira, 1997). Portanto, as regiões mais superiores do perfil regolítico, abaixo do nível de solo, tendem a conter maiores níveis de titânio, relacionados à transformação de minerais titaníferos primários em anatásio, enquanto a apatita é dissolvida e carregada desse nível, precipitando-se no nível inferior. Na zona saprolítica, a dissolução da apatita não é intensa, o que explica a geração de uma zona fosfática abaixo da zona enriquecida em titânio.

Soubiés *et al.* (1991) direcionaram seus estudos ao comportamento geoquímico dos elementos ETR durante a evolução do perfil regolítico no Complexo de Tapira. Para isso conduziram análises químicas e mineralógicas quantitativas e qualitativas das distintas zonas do perfil. De acordo com esses autores, na rocha mãe, as maiores concentrações de ETR vinculam-se com os cristais de perovskita, e com a progressão intempérica, esses elementos continuam apresentando forte associação com o mineral de titânio supérgeno, o anatásio. Entretanto, os ETR sofrem remobilizações a partir da estrutura cristalina deste mineral e são carregados por soluções fosfáticas, que se precipitam em fraturas e poros do próprio anatásio, na forma de fosfatos secundários do grupo do rabdofânio, mais enriquecidos em elementos ETR. Portanto, nas zonas mais superiores do perfil regolítico, que são extremamente enriquecidas em titânio na forma de anatásio, as concentrações de ETR também tendem a ser mais elevadas, uma vez que nessas regiões a dissolução da apatita primária é maior, possibilitando a precipitação de maiores concentrações de apatita ricas em ETR. Já nas regiões mais inferiores, a dissolução da apatita primária é pequena e a transformação dos minerais de titânio em anatásio também. Dessa forma, os ETR tendem a permanecer na própria estrutura cristalina da perovskita e as concentrações de apatita apresentam-se mais elevadas.

Oliveira *et al.* (1998) também promoveram estudos a cerca do comportamento de ETR no perfil laterítico do Complexo Alcalino de Catalão I. Os autores propuseram a segmentação do perfil regolítico de Catalão em cinco zonas (Figura 9). Da região mais inferior até o topo, esses horizontes dividem-se da seguinte maneira: rocha fresca; rocha alterada; saprólito isalterítico; saprólito aloterítico e solo.

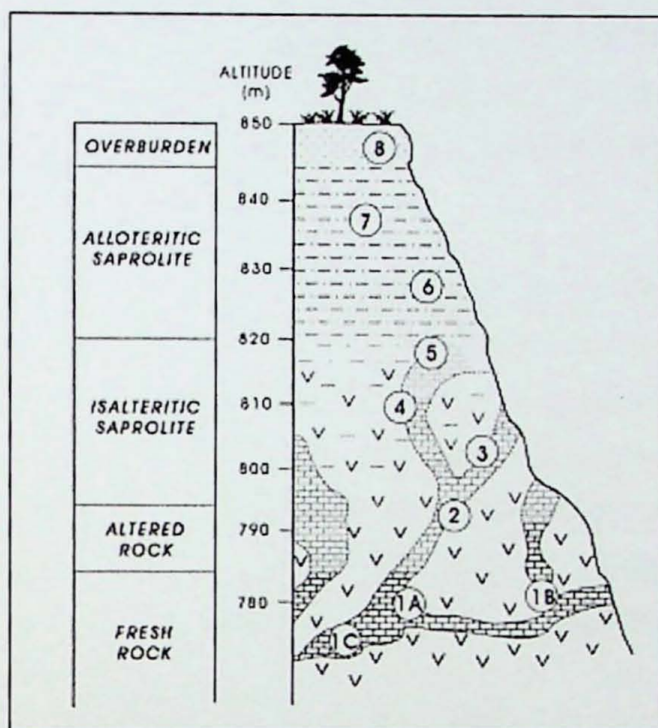


Figura 9. Horizontes do perfil regolítico de Catalão I. Observar que também são destacadas microfácies (diques) nos horizontes. Os números indicados referem-se a amostras do trabalho de Oliveira *et al.* (1998).

Oliveira *et al.* (1998) observaram solubilização da apatita nas zonas mais superiores, correspondentes ao saprólito aloterítico, e reprecipitação na forma de fosfatos secundários nesta mesma zona ou nas inferiores, de modo análogo ao observado por Soubiés *et al.* (1991). No horizonte do saprólito isalterítico, a apatita primária resiste à dissolução, o que explica concentrações mais elevadas desse mineral nessa zona.

Adicionalmente, aqueles mesmos autores ressaltam a dificuldade em relacionar as feições regolíticas do perfil intempérico com a rocha original, pois grande parte da mineralogia primária é alterada, juntamente com perdas de volume e massa. Estas transformações são mais acentuadas em direção ao topo do perfil, principalmente a partir de regiões do saprólito aloterítico.

4.3. Fundamentos de Estatística

4.3.1. Variáveis Aleatórias e Probabilidades

4.3.1.1. Conceituação de Variável Aleatória

Uma variável aleatória corresponde a uma variável cujo valor é obtido através da realização de um experimento (Yamamoto, 2001). Por exemplo, no caso de um depósito fosfático a variável aleatória (X) é o teor de P_2O_5 e o seu valor (x) é de, por exemplo, 5%, obtido a partir da análise de uma dada amostra retirada a partir de um lote L .

As variáveis aleatórias podem ser classificadas em dois tipos: as qualitativas e quantitativas. Quanto as variáveis quantitativas, têm-se dois grupos, as variáveis aleatórias discretas e as contínuas. As primeiras correspondem a variáveis que podem assumir valores contáveis, as últimas são variáveis que assumem qualquer valor em um intervalo de números reais (Magalhães & Lima 2002). No caso das variáveis aleatórias contínuas, podem ser citados, como exemplo, os teores de P_2O_5 , que para um dado depósito assumem qualquer valor no intervalo 0% a 7%.

4.3.1.2. Distribuição de Probabilidades

Aos valores de uma variável aleatória podem ser atribuídos valores de probabilidade, ou seja, a "chance" (P) de ocorrência para um dado valor da variável (X), ou intervalo de valores (a, b) da variável considerada (Pitard, 1993), conforme a equação 4.1. À função matemática que atribui a cada valor, ou intervalo de valores da variável aleatória, um valor de probabilidade chamamos, respectivamente, de *função de probabilidade* e *função densidade de probabilidade* (Magalhães & Lima, 2002).

$$P \{a \leq X \leq b\} = \int_a^b f(x) dx \quad 4.1$$

Os valores assumidos pela probabilidade P da equação acima podem variar de 0, probabilidade nula, a 1, e, portanto, satisfazem a seguinte relação:

$$0 \leq P \leq 1 \quad 4.2$$

A equação 4.1 permite também uma compreensão gráfica do problema, uma vez que os valores P da função são obtidos a partir da integral para uma dada parcela

do gráfico. A figura abaixo ilustra tal constatação para uma distribuição gaussiana (normal) (Figura 10).

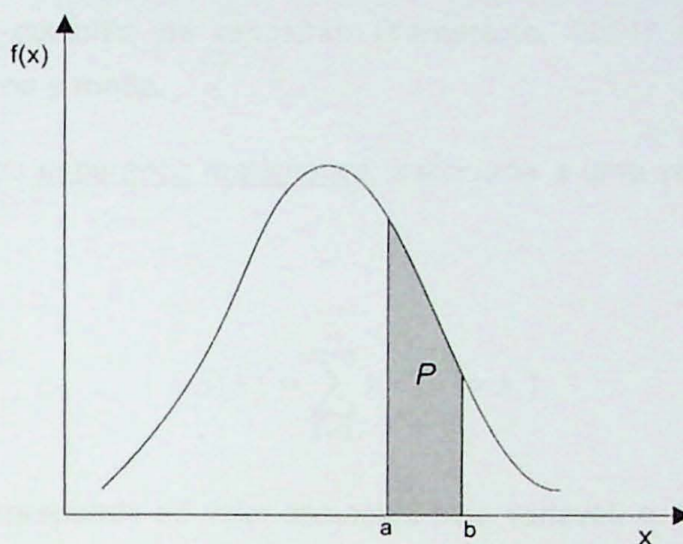


Figura 10. Distribuição normal, atribuindo uma probabilidade P para $f(x)$ no intervalo (a,b) . Para a área total sobre o gráfico P assume o valor de 1.

No caso das variáveis aleatórias contínuas, os modelos de distribuição de probabilidades mais característicos são o modelo uniforme, exponencial e normal (Magalhães & Lima, 2002). O modelo normal (Gaussiano) é o mais comumente utilizado para caracterizar a função de probabilidade para variáveis aleatórias – tanto discretas quanto contínuas, e é um dos mais importantes na estatística, seja na esfera teórica quanto na prática (Isaaks & Srivastava, 1989). Isto se justifica a partir do denominado Teorema do Limite Central, no qual se enuncia que a distribuição de variáveis aleatórias aproxima-se cada vez mais de uma distribuição normal à medida que se tomam mais e mais amostras.

Para o modelo normal, a função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad 4.3$$

Os parâmetros σ^2 , μ representam, respectivamente, a variância e a média da distribuição normal. E a partir dos resultados desses valores é possível obter-se as características da distribuição considerada, ou seja, diferentes médias e desvios padrões caracterizam distintas curvas de distribuição normal (Magalhães & Lima, 2002).

4.3.2. Medidas de Tendência Central

As medidas de Tendência Central possibilitam verificar os valores mais prováveis de um conjunto de amostras (Yamamoto, 2001) e são a esperança matemática, mediana e moda.

A média ou esperança matemática, associada a uma variável aleatória X , é dada por:

$$E[X] = \sum_{i=1}^n x_i P(x = x_i) \quad 4.4$$

Onde x_i corresponde ao valor assumido pela variável, e Px_i é a probabilidade de ocorrência atrelada ao valor x_i (Yamamoto, 2001). Caso a probabilidade de ocorrência para todas variáveis seja a mesma, têm-se:

$$E[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 4.5$$

A mediana representa o valor que ocupa a região central para um conjunto de dados ordenados, e satisfaz a seguinte relação:

$$P(X \geq Md) = 50\% \text{ e } P(X \leq Md) = 50\% \quad 4.6$$

A moda é o valor da variável que ocorre com maior frequência.

4.3.3. Medidas de Dispersão

As medidas de dispersão informam a distribuição dos valores em relação à média das amostras, e são a variância, o desvio padrão e o denominado coeficiente de variação.

A variância associada a um conjunto de dados, partindo-se da premissa de probabilidades iguais de ocorrência para cada um dos n valores, é dada por:

$$Var[X] = \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad 4.7$$

O desvio padrão é dado pela raiz da variância. O valor do coeficiente de variação é dado como a razão entre o desvio padrão e a média:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad 4.8$$

O coeficiente de variação é adimensional e conveniente para verificar a dispersão dos valores em torno da média, além de possibilitar a comparação para diferentes distribuições. Martins (2005) estabelece uma caracterização qualitativa com base nos valores do coeficiente de variação, onde:

- $CV < 15\%$ - baixa dispersão
- $15\% < CV < 30\%$ - média dispersão
- $CV > 30\%$ - alta dispersão

Os resultados do coeficiente de variação são importantes para indicar problemas no conjunto de dados, principalmente caso os valores associados a essas razão sejam maiores que 1, indicando possivelmente a presença de valores erráticos e/ou altos (Isaaks & Srivastava, 1989).

4.4. Fundamentos de Amostragem

A constatação de determinadas características de um universo ou população de dimensões apreciáveis é, na maioria das vezes, sustentada a partir de análises de parcelas da mesma, e é a este procedimento, e todas as implicações práticas associadas a ele, que denominamos de amostragem. Estas parcelas recebem o nome de amostras, e são compreendidas como um subconjunto ou uma parte selecionada a partir da totalidade de observações possíveis em uma população (Gy, 1973).

A teoria da amostragem estuda e busca compreender as relações existentes entre a população e as amostras retiradas a partir dessa (Pitard, 1993). A partir dessas relações que se verifica que as inferências tomadas a partir das amostras sempre estarão sujeitas a erros (variâncias). Dessa forma, práticas de controle de qualidade buscam compreender e mensurar os possíveis erros associados aos protocolos amostrais, e a partir disso propor medidas para coleta de amostras mais representativas. Entretanto, poucos são os empreendimentos mineiros que inserem

em suas rotinas essas práticas, muitas vezes reflexo de um desconhecimento da Teoria da Amostragem.

Neste contexto, as compreensões dos erros inevitavelmente atrelados aos processos de amostragem tornam-se essenciais. Além disso, a possibilidade de estimá-los e eventualmente minimizá-los é uma tarefa estratégica na mineração, gerando amostras mais confiáveis e que conduzirão a tomadas de decisão corretas. Os estudos de Pierry Gy (1973, 1998), Pitard (1993), Minitt *et al.* (2007) e outros autores, elucidam e caracterizam as categorias de erros passíveis de ocorrerem quando extraímos amostras a partir de um lote. Um desses erros, o denominado Erro Fundamental (σ_{FE}^2), é o único que pode ser estimado antes dos procedimentos de amostragem e é intimamente relacionado com as peculiaridades geológicas do minério: a denominada heterogeneidade constitucional e o fator constante de heterogeneidade (Minitt *et al.*, 2007; Pitard, 1993).

4.4.1. Heterogeneidade Constitucional (CHI)

Suponha, por exemplo, um lote L com teor absoluto a_L composto por uma população de fragmentos de minério em um dado estado de cominuição (Figura 11). A heterogeneidade a ser considerada é aquela referente às diferenças entre os diversos fragmentos componentes de L , e em relação a um dado componente 'A', e o seu conteúdo 'a' (teor). Cada fragmento F_i que compõe o lote pode ser inteiramente definido pela sua massa M_i e o teor a_i (Pitard, 1993), conduzindo à seguinte relação:

$$A_i = a_i M_i \quad 4.9$$

No caso de uma população totalmente homogênea, os valores de teor seriam $a_i = a_L$, entretanto não é este o caso, como claramente constata-se pela figura. Desse modo propõe-se que a heterogeneidade h_i carregada por cada fragmento é diretamente proporcional à $h_i = (a_i - a_L)$. Por motivos de conveniência coloca-se que $h_i = (a_i - a_L) / a_L$, resultando em um valor adimensional e relativo. Para cada fragmento tem-se que o parâmetro a_i é quantitativo e também qualitativo, enquanto que o parâmetro M_i é apenas quantitativo. Deste modo, a heterogeneidade de um fragmento é uma função crescente e diretamente proporcional à massa M_i , portanto, $h_i = (a_i - a_L) M_i / a_L M_L$, onde M_L corresponde à massa média de todo os fragmentos do lote. Portanto, têm-se que a heterogeneidade carregada por um fragmento em um lote L é:

$$h_i = \frac{(a_i - a_L)}{a_L} \cdot \frac{M_i}{M_L} = N_F \frac{(a_i - a_L)}{a_L} \cdot \frac{M_i}{M_L} \quad 4.10$$

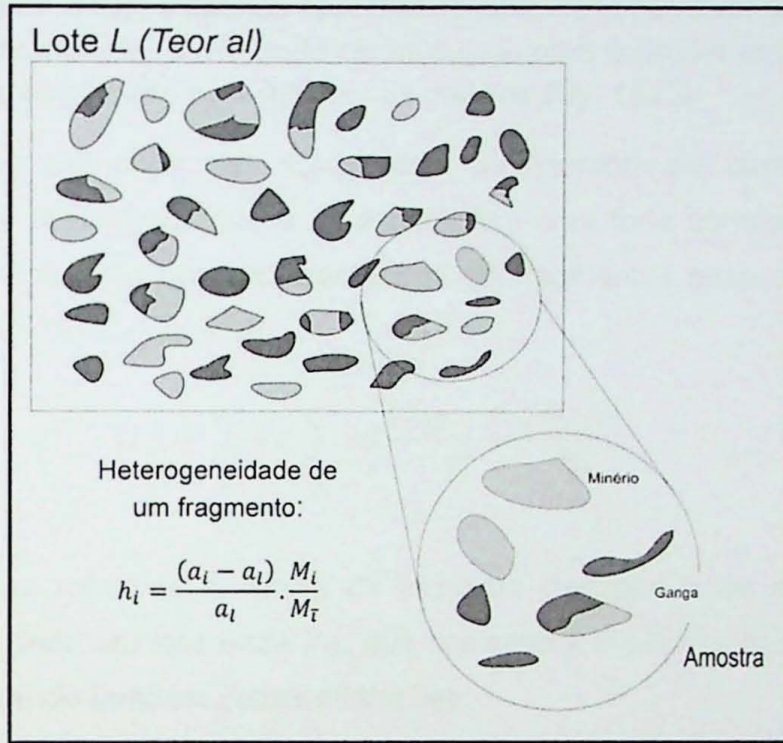


Figura 11. Lote L cujo teor total para o minério é dado por a_L . Cada fragmento componente deste lote possui características próprias para o teor (a_i) e para o valor M_i .

Como se observa pela equação 4.10 a estimativa da heterogeneidade constitucional para fragmentos de um lote é dependente de a_i , M_i e M_L , que são propriedades intrínsecas do material que compõe o lote, e não dependem do tamanho do lote considerado. Considerando-se que cada fragmento apresentará, portanto, uma heterogeneidade e que h_i representa uma variável aleatória, a variância h_i para os N_F fragmentos F_i que compõem o lote resulta na heterogeneidade constitucional do lote:

$$CHL = s^2(h_i) = \frac{1}{N_F} \sum_i (h_i)^2 = N_F \sum_i \frac{(a_i - a_L)^2}{(a_L)^2} \frac{M_i^2}{M_L^2} \quad 4.11$$

4.4.2. Fator Constante de Heterogeneidade Constitucional (IHL)

O cálculo da heterogeneidade constitucional através da fórmula apresentada acima é na prática inviável, uma vez que é impossível conhecer as características a_i e M_i de cada fragmento, principalmente se considerarmos um lote com volume de material muito grande (Pitard, 1993). Assim, multiplica-se o CHL por M_L/N_F que é a massa média do lote, obtendo-se o denominado fator constante de heterogeneidade:

$$IHL = CHL \frac{M_i}{N_F} = \sum_i \frac{(a_i - a_L)^2}{(a_L)^2} \frac{M_i^2}{M_L} \quad 4.12$$

Tanto o *IHL* quanto o *CHL* representam propriedades intrínsecas ao material investigado, porém o *CHL* é apenas aplicável no caso de lotes extremamente pequenos. Por outro lado, o *IHL* pode ser calculado para qualquer tamanho de lote, e, portanto, é mais apropriado para aplicações práticas (Gy, 1973).

O fator *IHL* pode ser aproximado considerando-se também valores de densidade, visto que os conteúdos a_i apresentam uma forte correlação com valores de densidade, enquanto que para tamanhos de fragmentos essa correlação não é relevante (Pitard, 1993). Dado isto:

$$IHL = \sum_{\alpha} V_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\beta} \frac{(a_{\alpha\beta} - a_L)^2}{a_L^2} \frac{M_{L\alpha\beta}}{M_L} \quad 4.13$$

Acima α refere-se a faixas de tamanho das partículas e β a faixas de densidade. Supondo um lote onde V_{α} , que representa o volume das partículas, seja constante, e fazendo também outras alterações:

$$(IHL)_{\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{a_L^2 M_L} \sum_{\beta} \lambda_{\beta} \frac{(a_{\alpha\beta} - a_L)^2}{a_L^2} \frac{M_{L\alpha\beta}}{M_L} \quad 4.14$$

O lote considerado para a equação acima é essencialmente composto por fragmentos de uma mesma faixa granulométrica e, por isso, o *IHL* estimado associa-se fundamentalmente a este estado de cominuição, recebendo o sufixo α . Como aproximação podemos então escrever que o *IHL*, para o material considerado, é dado por:

$$(IHL) = (IHL)_{\alpha 1} + (IHL)_{\alpha 2} + \dots + (IHL)_{\alpha k} \quad 4.15$$

Baseando-se na equação 4.13 assumem-se duas hipóteses para sua simplificação. E como resultado tem-se:

$$IHL = \left(\sum_{\alpha} V_{\alpha} M_{L\alpha} \right) \cdot \left(\sum_{\beta} \lambda_{\beta} \frac{(a_{\alpha\beta} - a_L)^2}{a_L^2} \frac{M_{L\beta}}{M_L} \right) \quad 4.16$$

Onde o primeiro termo é relativo ao tamanho das partículas do lote considerado e o segundo à densidade das mesmas. Estes dois termos são normalmente denominados de X e Y, respectivamente.

4.4.3. Cálculo Direto do IHL

O termo X acima descrito é diretamente proporcional a três importantes fatores, são eles: fator forma (f), fator granulometria (g) e fator diâmetro (d). Já o Termo Y relaciona-se diretamente com o fator mineralogia (c) e o grau de liberação (l). Esses fatores permitem o cálculo do IHL através da seguinte equação:

$$IHL = fgd^3cl \quad 4.17$$

4.4.3.1. Fator Forma (f)

O fator forma para um dado estado de cominuição apresenta relação com o volume das partículas V_a e seus diâmetros d_a , através da seguinte relação $V_a = f_a \cdot d_a^3$. Caso todos os fragmentos apresentem formas de cubo, por definição o valor de f_a será de 1. Se todos os fragmentos aproximarem-se de esferas de raio igual a 0,5, então tem-se:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 = f_a \quad 4.18$$

$$f_a = 0.523 \quad 4.19$$

Muitos experimentos mostram que a maioria dos minerais apresenta o fator forma por volta de 0,5, mas há exceções, como os minerais aciculares que apresentam fator forma por volta de 1, e os minerais placóides cujo fator aproxima-se de 0,1. Para fins práticos esse fator pode ser rapidamente calculado ao microscópio, comparando as observações com os valores acima (Pitard, 1993).

4.4.3.2. Fator Granulometria (g)

Este fator vincula-se à distribuição granulométrica do material que compõe o lote cuja heterogeneidade se deseja estimar (Pitard, 1993). Na verdade, ele é um fator compensador, pois mesmo que o lote esteja peneirado com um d_{95} conhecido, haverá diferenças granulométricas entre os fragmentos. Os valores desse fator são assim distribuídos:

- $g = 0,25$ para materiais com baixo grau de calibração, ou seja, presença de fragmentos com distintas granulometrias (exemplo: materiais coletados após uma britagem primária)

- $g = 0,55$ para materiais razoavelmente calibrados (por exemplo: material peneirado entre duas peneiras consecutivas)
- $g = 1,0$ para materiais com alto grau de calibração, ou seja, a variação granulométrica entre os fragmentos é baixa (por exemplo: um lote formado por cereais como arroz, lentilhas)

4.4.3.3. Fator Diâmetro (d)

Este fator é definido como a malha que retém não mais que 5% do material considerado para uma dada etapa, sendo, pois, 95% passante (Pitard, 1993).

4.4.3.4. Fator Mineralogia (c)

O fator mineralogia é definido como o valor máximo do fator Y da equação 4.16. Partindo-se da premissa de que um material é composto por dois constituintes principais, mineral de minério e ganga, e que estes estão totalmente liberados, têm-se a densidade da ganga como λ_g , já para o minério λ_M . Além disso, para a fração de densidade λ_M tem-se que $a_m = 1$ e para ganga $a_g = 0$ (Pitard, 1993). Substituindo esses valores no fator Y da equação 3.16:

$$Y_{max} = c = \lambda_M \frac{(1 - a_L)^2}{a_L} + \lambda_g (1 - a_L) \quad 4.20$$

4.4.3.5. Fator Grau de Liberação (l)

O fator liberação l é caracterizado como igual a 0 para materiais perfeitamente homogêneos, e o valor de $l = 1$ para situações quando o mineral de interesse está completamente liberado (Pitard, 1993).

4.4.4. Cálculo Indireto do IHL

O método de cálculo do fator constante de heterogeneidade IHL descrito no item (4.3.3) pode apresentar certas dificuldades na definição dos valores de seus fatores de forma, granulometria, diâmetro, mineralogia e liberação do material em questão. Quando estes valores são difíceis de estimar, Pitard (1993) recomenda um método indireto de estimativa de IHL . Este método baseia-se em um estimador para o cálculo do fator constante de heterogeneidade obtido a partir da equação 4.16. Resultando na equação abaixo:

$$EST\ IHL = g \sum \frac{(a_q - a_Q)^2}{a_Q^2} \frac{M_q^2}{M_Q^2} \quad 4.21$$

Onde a_Q é o teor médio de todos os grupos de amostras a coletadas no teste para uma dada faixa granulométrica, a_q é o teor de um grupo de amostra, M_q é a massa referente a esta amostra, e M_Q a massa total de todas as amostras ou grupo de amostras. O teste deve ser executado para três ou mais faixas granulométricas segundo Pitard (1993), e os resultados são avaliados através de uma regressão em gráfico di-log, que relacionará o diâmetro nominal das partículas com o fator IHL .

4.4.5. Erro Fundamental

A amostragem em si é um procedimento gerador de erros (Gy, 1998) No total, dez tipos de erros podem ocorrer quando se executa a retirada de uma alíquota a partir de um lote L . O erro total de amostragem compõe-se por estes dez erros, e representa uma variância total gerada pelo somatório de cada um desses componentes como propõem Gy (1998) e Pitard (1993):

$$TE = [NE + FE + GSE + QE1 + QE2] \\ + [DE + WE + PE + AE] \quad 4.22$$

TE é a variância total, ou erro total, e cada um dos componentes é dado por:

- Efeito Pepita (NE)
- Erro fundamental (FE)
- Erro de grupamento e segregação (GSE)
- Erros de flutuação de 1 ciclos (QE1)
- Erros de flutuação de 2 ciclos (QE2)
- Erros de delaminação (DE)
- Erros de extração (EE)
- Erro de pesagem (WE)
- Erro de preparação (PE)
- Erro analítico (AE)

Alguns destes erros podem ser eliminados através da rigorosidade técnica, outros podem apenas ser minimizados, mas nunca eliminados completamente (Minitt, 2007). Em particular, o erro fundamental (FE) é um dos erros que jamais será igual à zero, pois se vincula às características do material, suas propriedades intrínsecas (Pitard, 1993). Todavia, este erro pode ser estimado mesmo antes de uma amostragem, além de ser passível de redução. Dessa forma, o seu conhecimento torna-se relevante, permitindo verificar formas de reduzi-lo.

O erro fundamental é gerado pela heterogeneidade constitucional (CHI) relativa ao material, sendo diretamente proporcional a ela e, conseqüentemente, ao fator IH_L . Ele representa uma variância matemática dada por:

$$\sigma_{FE}^2 = \left(\frac{1}{M_s} - \frac{1}{M_L} \right) IH_L \quad 4.23$$

O cálculo do fator constante de heterogeneidade (IH_L) permite, portanto, verificar o erro fundamental associado aos diversos procedimentos de amostragem, e leva em consideração fatores como a granulometria do material a ser amostrado e as características mineralógicas e físicas do material. O cálculo de σ_{FE}^2 considera também a massa da amostra coletada (M_s) e a massa total (M_L) do lote considerado, o que possibilita responder questões como: Qual massa de amostra deve-se coletar de um dado lote para garantir um menor erro fundamental?

4.4.6. Amostragem de curto prazo

Em se tratando da Teoria da amostragem e sua implicação sobre os empreendimentos mineiros torna-se indispensável sua aplicação nos procedimentos executados na programação da exploração em curto prazo. Segundo Revuelta & Jimeno (1997), a amostragem de curto prazo objetiva executar a tarefa de validação, ou controle de teores, e muitas vezes define os teores que alimentarão a pilha de homogeneização, ou mesmo a usina de beneficiamento, caso não sejam realizados procedimentos de amostragem por correia transportadora antes da pilha, por exemplo (Figura 12).

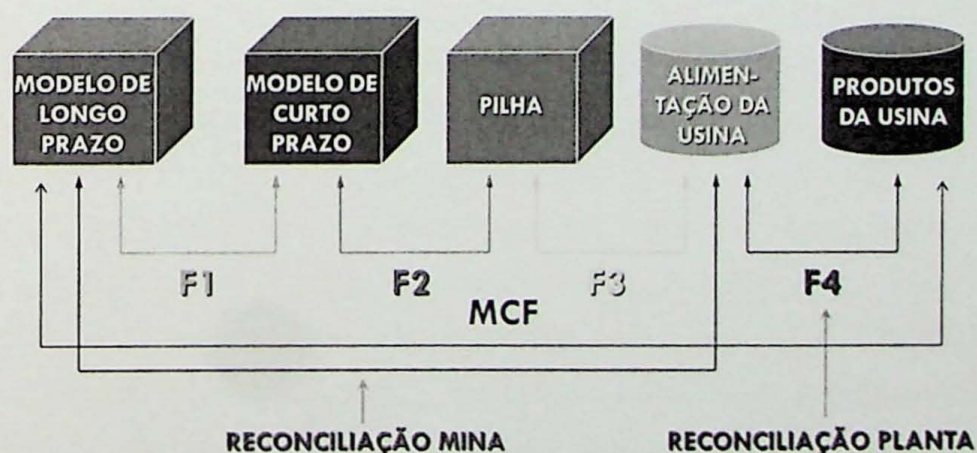


Figura 12. Esquema indicativo das distintas operações executadas, e das etapas de reconciliação entre estas operações. Atentar para o modelo obtido pelo curto prazo, que fornece resultados que se relacionam diretamente com a pilha, ou mesmo a usina, caso não ocorra amostragem no percurso pilha-usina (Chieregati *et al.* 2011)

Observa-se, portanto, que a amostragem de curto prazo desempenha papel fundamental, na medida em que fornece resultados norteadores das etapas a *posteriori*. Normalmente, estas amostras são coletadas a partir de furos de perfuratriz, com profundidades próximas da altura da bancada, sendo, posteriormente, enviadas para os procedimentos de preparação, passando por fases de quarteamento, britagem, pulverização e análise química.

Farias Junior (2010) executou estudos voltados à verificação da qualidade de amostras coletadas nesta etapa e, eventualmente, à proposição da adoção de procedimentos a fim de torná-las mais representativas. Neste trabalho, os métodos incluíram principalmente análises granuloquímicas para diferentes domínios do complexo carbonatítico de Cajati, verificando variações de teores das amostras para retirada de distintas alíquotas do pó de perfuratriz.

Nesse contexto, diversos procedimentos fundamentados na Teoria da amostragem devem ser adotados visando à otimização das coletas de amostras de curto prazo, ou seja, à diminuição dos erros inevitavelmente associados ao processo de amostragem. E para isto esses erros devem ser calculados. Koyama *et al.* (2009) exemplificam claramente a eficácia da estimativa da heterogeneidade constitucional e sua utilização para avaliar os erros associados a distintas etapas de preparação das amostras de curto prazo.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Coleta das amostras

A coleta de amostras representou uma etapa extremamente relevante e decisiva para o presente projeto. Considerando-se os diversos tipos de amostragem possíveis em depósitos minerais, tais como amostragem aleatória simples, amostragem estratificada e amostragem sistemática, foi adotado nesse estudo um método híbrido entre a amostragem estratificada e a sistemática. Muitas discussões foram levantadas a este respeito durante o andamento do projeto, nas quais contribuíram significativamente pesquisadores da Universidade de São Paulo e geólogos da Vale Fertilizantes, e que foram importantíssimas para uma tomada de decisão embasada.

Inicialmente, a possibilidade de coleta de amostras do pó de perfuratriz em blocos 25m x 25m x 10m, representativos do depósito, foi cogitada. Esta ideia foi abandonada, pois a coleta a partir desse método é extremamente pontual e não permite verificar com confiabilidade o material geológico que está sendo amostrado. Além disso, a recuperação é baixa para materiais friáveis e com alta umidade, que é o caso do minério da Mina de Tapira. Outra possibilidade considerada foi a coleta a partir da correia transportadora que alimenta a pilha de homogeneização, entretanto esse método também mostrou-se inadequado devido complicações técnicas e também de segurança.

Dessa forma, optou-se por coleta de amostras de frentes de lavra, em especial em frentes atualmente ativas, e cujos modelos de médio e longo prazo indicassem bons teores para a variável P_2O_5 . A amostragem foi programada para ser executada na região da Frente 2, denominada na mina de "Região da Bigorna" (Figura 13), da qual se lavra atualmente a maior parte de minério fosfático, representando mais de 70% em volume do minério total lavrado. No total, foram coletados amostras em 12 pontos (Figura 13), na região do banco 1230. Em cada ponto foram amostrados aproximadamente 25 kg de material, que compuseram amostras representativas das fáceis e micro-fácies de minério características da zona de coleta.



Figura 13. Localização da Frente 2 ("Região da Bigorna") vista em perspectiva (acima) e em planta (abaixo), mostrando os 12 pontos de amostragem no banco 1230.

Com base em Oliveira *et al.* (1998), a zona de amostragem corresponde ao saprólito isalterítico (Figura 14), mais enriquecido em apatita e que preserva algumas das estruturas primárias da rocha original e sua mineralogia. Entretanto, essas estruturas podem encontrar-se obliteradas por processos supérgenos, além disso, a dissolução de minerais carbonáticos e silicáticos, tais como olivina e diopsídio, é um processo comum nessa zona, embora em menor escala em relação ao horizonte aloterítico. A região de coleta é denominada pela equipe da Mina de Tapira de zona fosfática, conforme figura apresentada no tópico 4.1.3.

No horizonte amostrado, o saprólito apresentava variações composicionais, sendo constituído por argilominerais (zonas alaranjadas), apatita e magnetita alterada (zonas cinza), argilominerais e relíquia de feldspatos (zonas esbranquiçadas) e

argilominerais, vermiculita e apatita intersticial (zonas bege), como esquematizado na Figura 14.

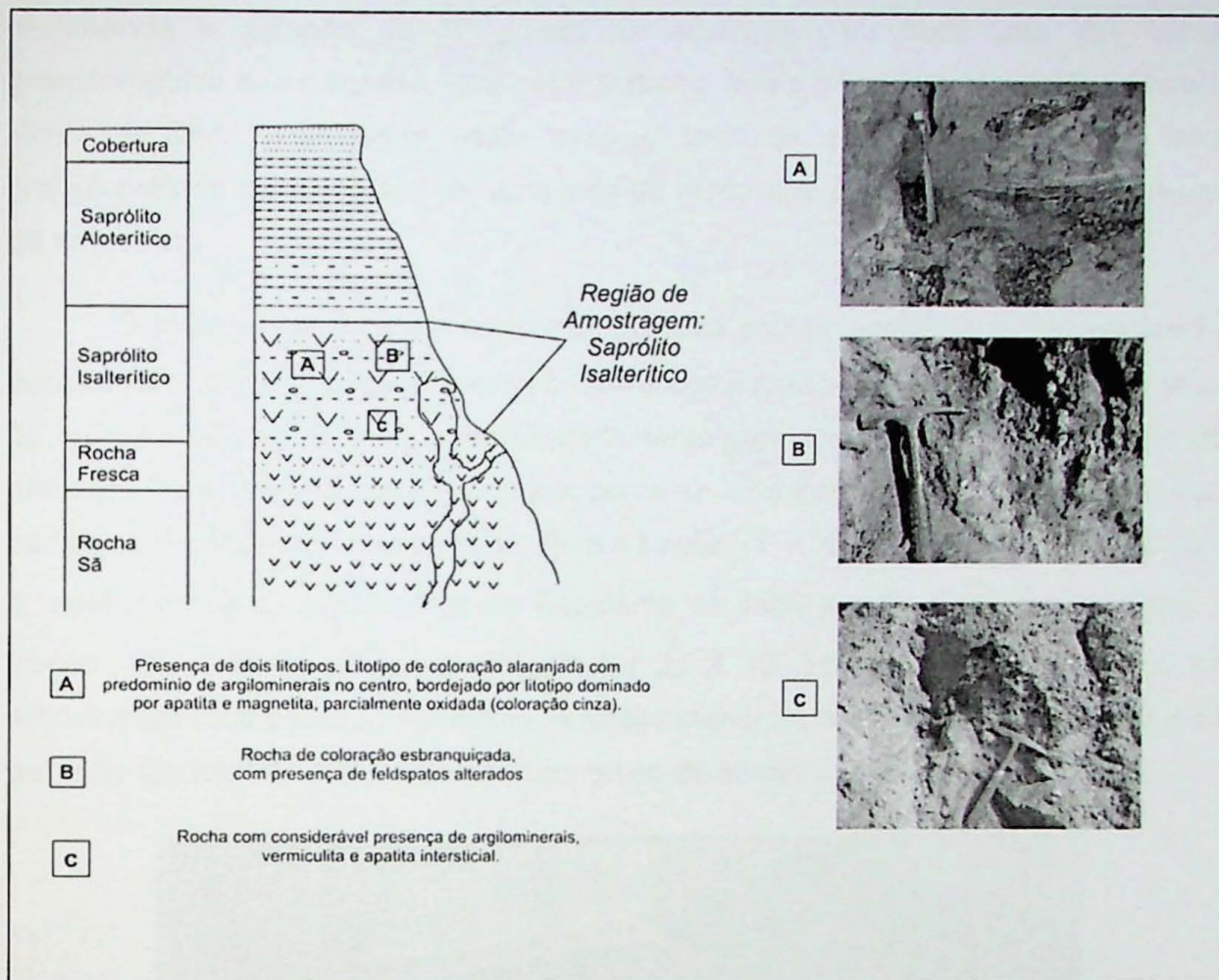


Figura 14. Localização das amostras coletadas levando-se em consideração às características de um perfil regolítico, de acordo com Oliveira *et al.* (1998). As amostras indicadas por A, B e C referem-se à litotipos descritos durante a amostragem na frente 2, banco 1230, sem escala.

5.2. Preparação das Amostras

Após a finalização das coletas, as amostras seguiram para as etapas de preparação. Primeiramente, todo o material coletado foi enviado à estufa, permanecendo nessa durante 24 horas. Após a secagem, o material foi britado e peneirado para que fosse passante na fração 1', sendo então homogeneizado.

Para a estimativa indireta, através do denominado teste de heterogeneidade deve-se separar o material em no mínimo três frações granulométricas. Dessa forma, todo o material foi submetido ao peneiramento em 4 malhas: 1', ½', 6mm e 3mm, resultando nas seguintes frações -1' + ½', - ½' + 6mm e - 6mm + 3mm. As amostras dessas três faixas granulométricas foram então separadas para execução do teste de heterogeneidade pela Metodologia Indireta.

5.3. Teste de Heterogeneidade – Metodologia Indireta

Para a execução do denominado teste de heterogeneidade, Pitard (1993) recomenda a geração de 50 grupos de amostras para cada uma das faixas granulométrica selecionadas, que neste trabalho foram três: $-1' + \frac{1}{2}'$, $-\frac{1}{2}' + 6\text{mm}$ e $-6\text{mm} + 3\text{mm}$, totalizando neste caso o total de 150 amostras. Cada faixa granulométrica deve, então, ser arranjada de modo que possa compor os 50 grupos de amostras.

O método consiste em coletar de maneira equiprobabilística Q fragmentos F_q para compor cada grupo. Para minérios fosfáticos é necessário ter-se $Q \geq 50$, ou seja, 50 ou mais fragmentos coletados aleatoriamente para composição de cada grupo de amostra. Para que isto fosse executado gerou-se uma matriz sobre bancada para que cada fração pudesse ser espalhada. Para a fração $-1' + \frac{1}{2}'$ utilizou-se uma matriz 10×5 , coletando-se aleatoriamente um fragmento de cada porção a_{ij} da matriz. Para a fração $-\frac{1}{2}' + 6\text{mm}$ utilizou-se uma matriz 25×10 , gerando para cada grupo de amostra um total de 250 fragmentos. A fração menor foi espalhada em matriz 10×45 gerando um total de 450 fragmentos por grupo de amostra (Figura 15)



Figura 15. Foto de parcela da matriz 10×45 utilizada na composição dos grupos da menor fração para execução do Teste de Heterogeneidade – Metodologia Indireta.

Terminada a coleta e composição de 50 grupos de amostras para cada faixa granulométrica procedeu-se com a pesagem das mesmas e envio para o Laboratório de Análises Químicas da Vale Fertilizantes S.A. As análises do conteúdo de P_2O_5

foram feitas por fluorescência de raios-X, em pastilhas prensadas, em Espectrômetro de Fluorescência Phillips PW 1660. Os resultados das análises químicas e o seu tratamento estatístico para estimativa da heterogeneidade constitucional encontram-se no tópico destinado aos resultados.

6. RESULTADOS

6.1. *Gráficos de Deriva (curto prazo x longo prazo)*

A amostragem é etapa fundamental para garantir que os modelos de longo e curto prazo gerados sejam consistentes. Conforme indicado pela Figura 12 os modelos de curto e longo prazo podem e devem ser paralelizados, de modo a verificar possíveis diferenças entre eles, que, por sua vez, podem estar relacionadas a procedimentos de amostragem inadequados, principalmente em relação às amostras de curto prazo.

Normalmente, a amostragem de curto prazo é obtida a partir de furos de perfuratriz, enquanto que a amostragem de longo prazo provém de furos de sondagem destinados à avaliação e atualização dos recursos e reservas. Portanto, amostras de longo prazo são, quando corretamente analisadas, acuradas e precisas, ou seja, são amostras de relevante qualidade.

Baseado nisto, é necessário analisar, a partir de gráficos comparativos entre esses distintos modelos, a variável P_2O_5 . Esta análise foi feita a partir da base de dados da Geologia da Mina de Tapira, e insere-se em uma das etapas do atual projeto de reconciliação na mina, cujo desenvolvimento está sobre coordenação do Professor Dr.º Rodrigo Peroni (UFRGS).

Na Mina de Tapira, os dados de longo prazo são obtidos a partir de sondagem exploratória rotativa diamantada de diâmetro NQ (3" ou 77,5 mm de diâmetro interno). Amostras de testemunhos de sondagem para análise química são coletadas em um intervalo regular de 2 m.

Os dados de curto prazo são obtidos a partir de pó de perfuratriz em frente de lavra. Em média, a perfuratriz roto percussiva modelo Atlas Copco ROC F9 gera amostras de 150 kg, que passam por um primeiro quarteamento em campo, obtendo-se como produto final amostras de 15 a 20 kg. Esta massa é posteriormente enviada ao Galpão de Geologia para preparação, que inclui secagem, peneiramentos, britagem, pulverização e quarteamentos (Figura 16).

A comparação entre os diferentes dados – curto prazo *versus* longo prazo – foi executada sobre regiões nas quais o número de dados de ambas as origens fossem semelhantes e significativos. Com isso, as amostras de longo prazo foram também regularizadas para o suporte das amostras de curto prazo, analisadas de 10 em 10 m. E, por final, utilizou-se um *script* desenvolvido para examinar dados de naturezas distintas. Alguns dos gráficos de deriva são apresentados abaixo, mas sem a localização dos polígonos utilizados para comparação, por motivos de segurança empresarial (Figura 17).

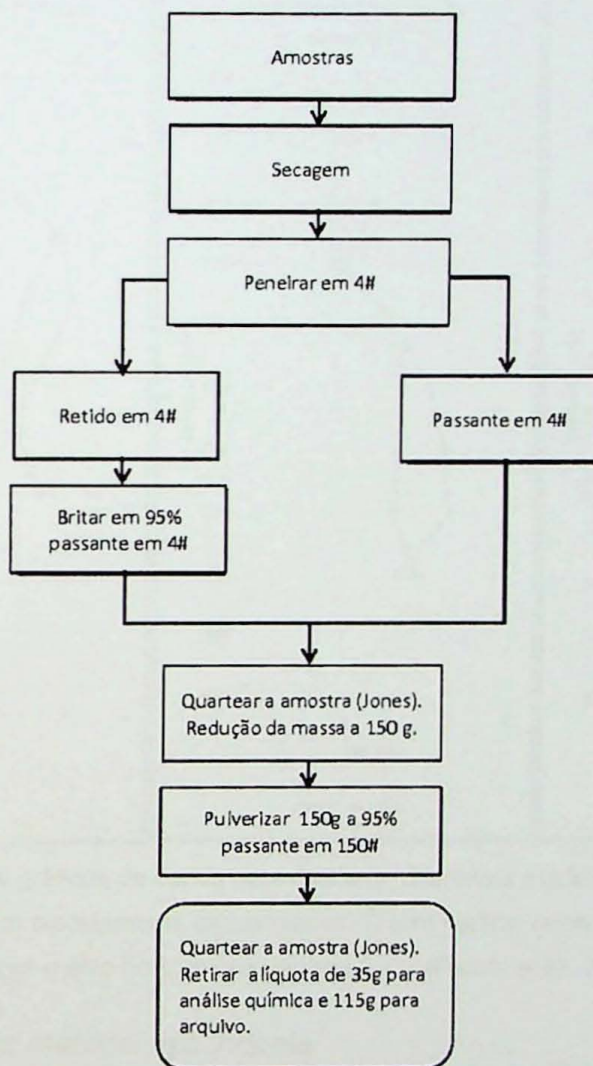


Figura 16. Fluxograma das etapas de preparação das amostras de curto prazo na Mina de Tapira, após a coleta em campo.

A observação dos gráficos apresentados sugere claramente um descolamento dos valores para variável P_2O_5 entre os diferentes modelos. Surge, portanto, questionamentos pertinentes, que buscam compreender se este descolamento é resultante de fatores inerentes à qualidade das amostras, incluindo-se potenciais erros gerados em sua preparação, principalmente os relativos às amostras

de curto prazo. A partir dessa constatação de que existem diferenças bastante significativas nos teores de P_2O_5 quando comparados os dados de longo e curto prazo, a verificação da heterogeneidade constitucional do minério passa a ser de grande importância, especialmente para a quantificação de erros associados às etapas de amostragem de curto prazo. Assim, os resultados do cálculo da estimativa da heterogeneidade constitucional e, conseqüentemente, os erros associados às etapas de curto prazo são apresentados abaixo.

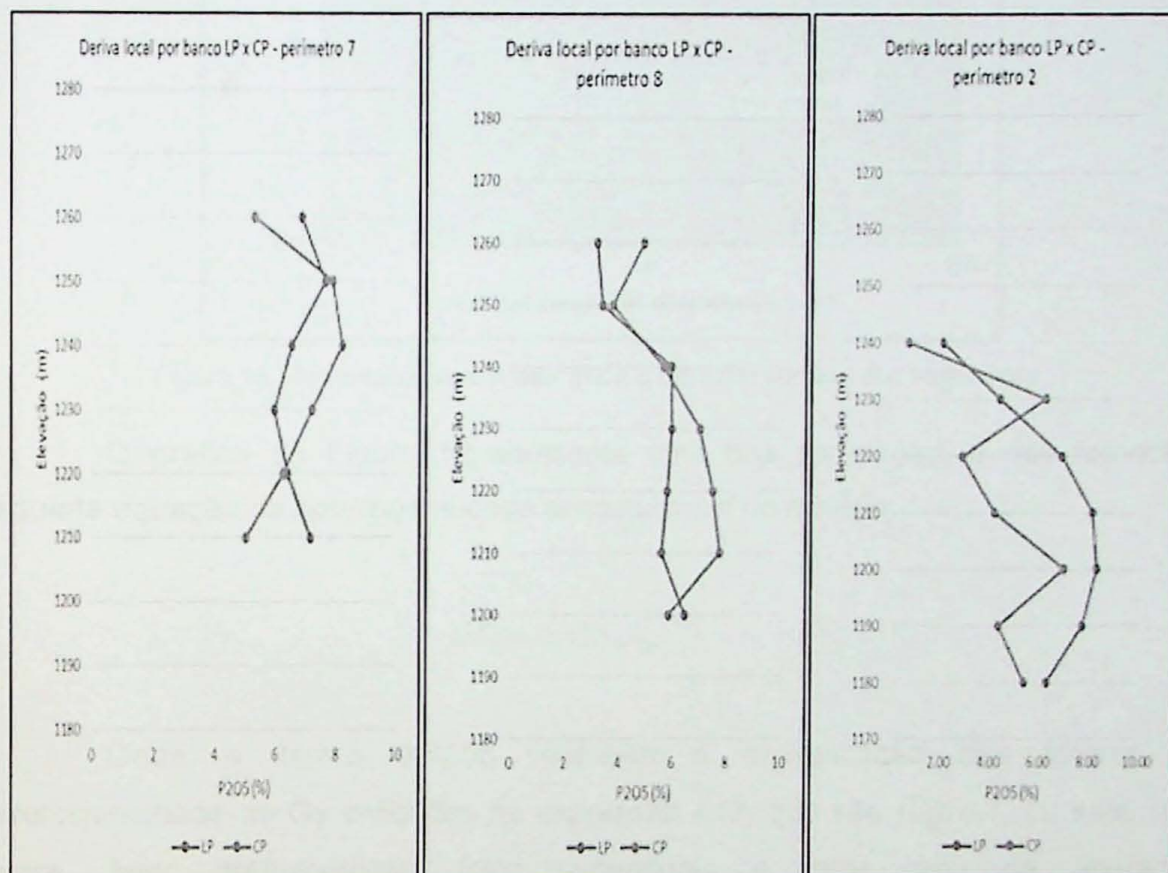


Figura 17. Exemplos de gráficos de deriva para dados de diferentes modelos, curto prazo (CP) e longo prazo (LP), mas que foram corretamente regularizados. O eixo vertical refere-se à profundidade, enquanto que o eixo horizontal à variável P_2O_5 (Peroni *et al.*, 2014).

6.2. Fator IHL pela metodologia indireta

A partir dos resultados obtidos pelo teste de heterogeneidade e apresentados na Tabela 1, foi executado o cálculo da heterogeneidade constitucional através da fórmula abaixo, já apresentada na fundamentação teórica:

$$EST\ IHL = g \sum \frac{(a_q - a_Q)^2}{a_Q^2} \frac{M_q^2}{M_Q^2} \quad 6.1$$

Esta fórmula permite estabelecer o fator constante de heterogeneidade a partir de um método estatístico que tem demonstrado boas aplicações práticas. O resultado é expresso em um gráfico di-log que correlaciona o diâmetro dos fragmentos componentes de um lote e o fator IHL para este diâmetro (Figura 18)

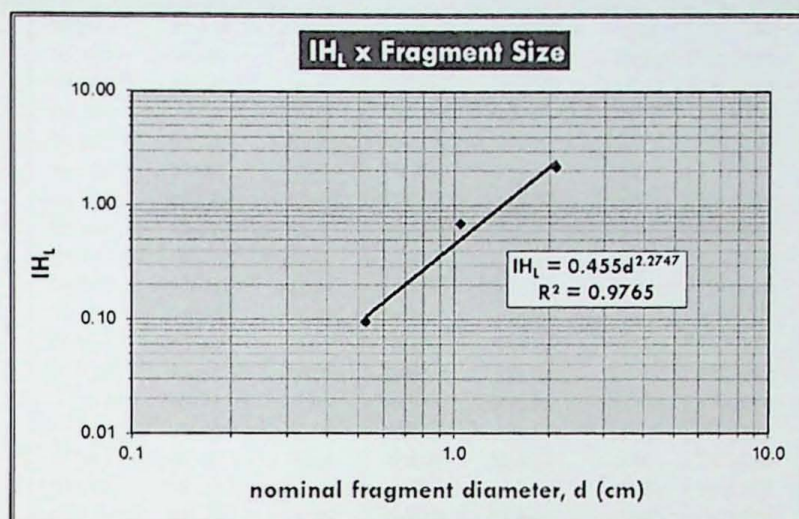


Figura 18. Correlação entre o fator IHL e o diâmetro nominal dos fragmentos.

O gráfico da Figura 19 apresenta uma boa correlação, e nos fornece a seguinte equação da heterogeneidade constitucional do minério:

$$IH_L = 0,455 d_{95}^{2,2747} \quad 6.2$$

Onde o termo 0,4555 refere-se à multiplicação dos fatores de heterogeneidade de Gy indicados na expressão 4.17, que são f, g, c, l , ou seja, fator forma, fator granulometria, fator mineralogia e fator grau de liberação, respectivamente. O expoente do termo d forneceu um valor de 2,27, que é relativamente próximo ao da fórmula utilizada pela metodologia direta, que seria 3 (Equação 4.17).

Tabela 1. Massa (g) e teores de P_2O_5 (%) das 150 amostras coletadas para a execução do teste de heterogeneidade, sendo 50 para cada faixa granulométrica. Os resultados foram utilizados para cálculo estatístico do fator constante de heterogeneidade constitucional do minério fosfático da Mina de Tapira.

size fraction #sample	-6,35+3,34 mm			-12,7+6,35 mm			-25,4+12,7 mm		
	ID	mass (g)	% P_2O_5	ID	mass (g)	% P_2O_5	ID	mass (g)	% P_2O_5
1	TH 301	81.59	8.85	TH 601	338.40	9.54	TH 1201	619.04	8.49
2	TH 302	66.92	8.92	TH 602	332.71	10.58	TH 1202	292.56	8.38
3	TH 303	76.56	9.74	TH 603	303.92	10.21	TH 1203	279.67	11.20
4	TH 304	77.81	9.35	TH 604	303.61	8.32	TH 1204	203.17	10.89
5	TH 305	91.41	10.28	TH 605	276.95	10.56	TH 1205	238.08	9.47
6	TH 306	77.48	9.80	TH 606	273.54	10.16	TH 1206	257.52	9.21
7	TH 307	81.00	10.30	TH 607	276.80	8.39	TH 1207	200.03	9.47
8	TH 308	81.10	9.28	TH 608	259.72	9.82	TH 1208	218.93	10.48
9	TH 309	76.38	9.37	TH 609	204.88	10.61	TH 1209	225.43	9.94
10	TH 310	70.74	10.66	TH 610	177.91	9.47	TH 1210	285.89	9.41
11	TH 311	74.73	9.47	TH 611	242.74	9.59	TH 1211	223.68	10.45
12	TH 312	68.49	9.52	TH 612	215.43	8.50	TH 1212	270.04	10.12
13	TH 313	71.85	8.68	TH 613	209.64	10.91	TH 1213	276.58	10.39
14	TH 314	69.57	9.84	TH 614	219.76	10.25	TH 1214	334.70	10.09
15	TH 315	63.20	9.12	TH 615	173.25	10.51	TH 1215	359.96	10.33
16	TH 316	84.39	9.58	TH 616	208.75	9.36	TH 1216	325.71	7.01
17	TH 317	77.26	9.43	TH 617	177.18	10.02	TH 1217	278.33	7.92
18	TH 318	61.53	9.46	TH 618	198.95	9.43	TH 1218	241.99	10.40
19	TH 319	65.32	9.54	TH 619	217.59	10.35	TH 1219	265.25	10.24
20	TH 320	68.79	9.25	TH 620	160.02	11.15	TH 1220	204.81	10.15
21	TH 321	70.90	9.11	TH 621	162.52	9.69	TH 1221	351.02	8.92
22	TH 322	66.35	9.29	TH 622	197.61	8.83	TH 1222	234.13	7.66
23	TH 323	63.16	9.71	TH 623	220.58	10.40	TH 1223	221.27	10.44
24	TH 324	65.76	10.10	TH 624	175.19	10.27	TH 1224	289.86	9.25
25	TH 325	85.87	9.60	TH 625	227.40	9.25	TH 1225	236.55	7.87
26	TH 326	64.51	9.69	TH 626	219.75	9.49	TH 1226	372.76	10.82
27	TH 327	61.42	9.17	TH 627	181.02	10.10	TH 1227	297.23	11.59
28	TH 328	76.48	9.72	TH 628	182.73	10.15	TH 1228	255.05	8.52
29	TH 329	65.70	8.85	TH 629	224.95	8.97	TH 1229	312.64	10.76
30	TH 330	73.37	9.49	TH 630	172.02	10.76	TH 1230	279.37	10.31
31	TH 331	58.11	9.26	TH 631	186.15	9.99	TH 1231	253.44	9.00
32	TH 332	68.44	9.86	TH 632	158.15	9.11	TH 1232	304.13	9.24
33	TH 333	58.13	8.59	TH 633	196.86	8.79	TH 1233	335.75	10.51
34	TH 334	60.80	9.70	TH 634	159.14	10.00	TH 1234	251.78	9.27
35	TH 335	58.23	8.85	TH 635	146.49	9.89	TH 1235	283.08	10.63
36	TH 336	66.96	9.05	TH 636	166.23	9.84	TH 1236	331.70	10.61
37	TH 337	54.11	9.86	TH 637	138.66	8.91	TH 1237	299.98	9.74
38	TH 338	55.93	8.58	TH 638	151.76	8.72	TH 1238	250.37	10.28
39	TH 339	69.29	9.27	TH 639	164.20	10.90	TH 1239	324.42	8.52
40	TH 340	69.04	10.13	TH 640	246.23	10.13	TH 1240	346.77	12.10
41	TH 341	79.18	10.34	TH 641	237.50	9.62	TH 1241	288.84	11.67
42	TH 342	55.24	9.43	TH 642	250.81	9.81	TH 1242	280.30	10.44
43	TH 343	53.00	9.51	TH 643	205.55	9.88	TH 1243	309.00	10.55
44	TH 344	53.54	9.62	TH 644	180.76	9.70	TH 1244	311.06	9.54
45	TH 345	76.56	9.05	TH 645	176.86	9.78	TH 1245	412.11	10.34
46	TH 346	59.99	9.01	TH 646	180.74	11.05	TH 1246	378.93	9.64
47	TH 347	69.73	9.87	TH 647	173.95	8.61	TH 1247	367.04	10.42
48	TH 348	61.36	9.22	TH 648	172.93	8.85	TH 1248	381.81	10.79
49	TH 349	58.87	9.07	TH 649	196.79	10.60	TH 1249	440.71	8.96
50	TH 350	70.53	9.42	TH 650	138.52	10.64	TH 1250	579.06	9.03
total mass (M_{EL})		3436.7			10363.8			15181.5	
mean		68.7	9.457		207.3	9.809		303.63	9.829
abs std deviation			0.461			0.736			1.068
rel std deviation (%)			4.9			7.5			10.9
variance			0.213			0.542			1.141

6.3. Avaliação do Atual Protocolo Amostral do curto prazo

A obtenção do fator IHL pelo item anterior, através da metodologia indireta, permite avaliar os erros (variâncias) associados aos procedimentos de amostragem de curto prazo. Esta avaliação baseia-se fundamentalmente na fórmula abaixo, abordada durante o tópico destinado à revisão bibliográfica.

$$s_{FSE}^2 = c f g l d^3 \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right) = IHL \left(\frac{1}{M_S} - \frac{1}{M_L} \right) \quad 6.3$$

Para o seu cálculo, como já enunciado, pode-se proceder utilizando os fatores de Gy, caso da metodologia direta, ou o fator IHL, calculado diretamente pela metodologia indireta. A utilização dos resultados obtidos pelo teste de heterogeneidade fornecem geralmente melhores resultados, pois a determinação dos fatores de Gy é difícil e pode fornecer resultados pouco acurados. Dado isto, os resultados para o atual protocolo de preparação são apresentados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Variâncias para as distintas etapas de curto prazo. Os valores obtidos são relativamente baixos e encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela teoria da amostragem.

Etapa	Massa _L (g)	Massa _S (g)	d ₉₅ (cm)	IHL	Erro Fundamental (s ²)
1.Coleta de Amostra	150000	20000	2.5	116.3641	0.50%
2.Britagem Primária	20000	20000	0.476	3.055259	0.00%
3.Quarteamento Primário (Jones)	20000	150	0.476	3.055259	2.02%
4.Pulverização	150	150	0.0105	0.000708	0.00%
5.Quarteamento Secundário (Jones)	150	35	0.0105	0.000708	0.00%
Total					2.527358262

O erro total obtido para os procedimentos amostrais é relativamente baixo, sendo que o erro fundamental mais significativo foi relacionado à etapa de Quarteamento Primário (Jones) onde alcança 2,02% e, subordinadamente, à etapa de coleta das amostras (0,5%). Esse valor baixo do erro total se explica pelo valor também baixo da heterogeneidade constitucional calculada (0,455) e, principalmente, aos teores de fosfato extremamente elevados na Mina de Tapira, que apresenta valores em média de 7% de P₂O₅. Ainda que esses teores possam estar distribuídos irregularmente no depósito, não há dissolução elevada caso se execute a lavra no horizonte isalterítico. Entretanto, este resultado não é indicativo de que as amostras obtidas pelos furos de perfuratriz são adequadas, mas apenas demonstram que os atuais procedimentos de preparação das amostras não geram variâncias elevadas.

6.4. Comparação entre o fator IHL para outras tipologias de minérios

A comparação da heterogeneidade constitucional para distintos depósitos minerais é também pertinente, uma vez que possibilita avaliar o comportamento do fator IHL para cada um, e possivelmente utilizá-lo como um indicativo das características do depósito, o que ainda não foi proposto por trabalhos anteriores. A tabela abaixo traz valores para três depósitos, um aurífero, localizado em uma mina na Argentina, um bauxítico - Mina do Juruti, Pará (Koyama *et al.*, 2010, Bortoleto *et al.*, 2014). , e o terceiro para a Mina de fosfato de Tapira.

A compilação desses resultados conduz a considerações interessantes. A sua análise indica que o resultado da heterogeneidade constitucional para o depósito de ouro é extremamente elevada, resultado condizente pela perspectiva geológica, pois estes depósitos são extremamente heterogêneos, com distribuições irregulares de teores.

Tabela 3. Comparação do fator de heterogeneidade constitucional para diferentes jazidas minerais. Dados retirados dos trabalhos de Koyama *et al.* (2010)* e Bortoleto *et al.* (2014)**.

Heterogeneidade Constitucional (Fator IHL) para distintas mineralizações através da metodologia indireta	
Tipo de Mineralização	Fator IHL
Aurífera*	$IHL = 52,256. d^{2,625}$
Bauxita ** (Mina do Juruti)	$IHL = 0,0638. d^{2,34}$
Fosfato (Mina de Tapira)	$IHL = 0,45. d^{2,2747}$

Os dados para o depósito de bauxita e fosfato apresentam valores muito menores relativamente ao do depósito aurífero. Na realidade, tanto a jazida fosfática quanto a de bauxita evoluíram através de processos supérgenos, conduzindo a um incremento de teores, e também geração de melhor continuidade da mineralização, ou seja, a geração de um perfil regolítico que, de um modo simplista, apresenta-se com zonas horizontalizadas. Além disso, acrescenta-se que a heterogeneidade vinculada à bauxita tem valor uma ordem de grandeza menor que o do minério de fosfato, indicando possivelmente que o depósito bauxítico apresenta melhor continuidade.

Portanto, os valores da heterogeneidade constitucional podem eventualmente relacionarem-se com as características geológicas do depósito em estudo, e indicam uma forma de quantificação das heterogeneidades desses depósitos. Todavia, este

valor não pode subestimar as reais características geológicas e estruturais de um depósito mineral, e apenas confirma as informações fornecidas por um estudo geológico adequado.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os estudos e as práticas continuamente desenvolvidas junto ao segmento mineiro visam garantir cada vez mais o aumento da produtividade, a partir da caracterização tecnológica, qualificação da distribuição de teores no depósito, dentre outros. Nesse sentido, o cálculo da denominada Heterogeneidade Constitucional de um minério permite verificar quantitativamente os erros associados às mais diversas etapas de amostragem, e com isso, garantir, sistematicamente, amostras de qualidade. Por consequência, possíveis prejuízos relacionados à atividade mineira serão minimizados, tornando o empreendimento mais produtivo e também sustentável, uma vez que a vida útil da mina será ampliada.

A estimativa da Heterogeneidade Constitucional para o minério fosfático da Mina de Tapira foi executada através do Teste de Heterogeneidade – Metodologia Indireta, tomando-se como alicerce as premissas relativas à Teoria da Amostragem. O resultado indicou que o minério da Frente 2 ("Região da Bigorna") apresenta valores relativamente baixos para a heterogeneidade constitucional. A partir disto utilizou-se este valor para avaliar os erros associados ao atual protocolo amostral do curto prazo. Em particular, a amostragem de curto prazo, que na Mina de Tapira provém de amostras do pó de perfuratriz, configura-se como norteadora de decisões que envolvem a mina/usina.

A estimativa das variâncias associadas aos procedimentos do curto prazo resultou em valores dentro dos limites estabelecidos pela teoria da amostragem, sendo que as etapas com maiores s_{FSE}^2 foram: o quarteamento primário, com valor próximo a 2,02%; e a coleta de campo (quarteamento de campo) com valor de 0,5%. Entretanto, tais resultados não são indicativos da qualidade relacionada às amostras de curto prazo, e apenas apontam que os atuais procedimentos de preparação das amostras são desejáveis.

A análise dos gráficos comparativos entre os valores da variável P_2O_5 obtidos pelo curto/longo prazo indica uma não aderência desses modelos, o que possivelmente vincula-se a problemas com relação às amostras do pó de perfuratriz. É

provável que tais problemas sejam gerados pelas características do minério fosfático, que se encontra na zona isalterítica do saprólito, e por isso é consideravelmente friável e úmido, o que deve gerar baixas taxas de recuperação a partir da coleta por perfuratriz.

Outro aspecto a ser considerado é o procedimento de campo utilizado na coleta das amostras provenientes da perfuratriz. Esse é executado manualmente, por funcionários terceirizados que se utilizam de uma pá para coleta. Por isto é provável que ocorra um enviesamento das amostras, o que deve ser reavaliado pela equipe Vale Fertilizantes. Propõe-se, caso ainda opte-se pela amostragem de pó de perfuratriz, que essa coleta seja otimizada recorrendo-se a quarteadores de campo adaptados para materiais úmidos.

Com base nisto, sugere-se também que sejam executados estudos:

- Buscando avaliar a recuperação do minério fosfático a partir da perfuratriz, e o quanto de massa é perdido durante a perfuração;
- De análises granulométricas para distintos furos de perfuratriz, estrategicamente distribuídos pelo depósito;
- Utilizando-se de duplicatas de campo, a partir de todo material descartado pela coleta primária;

Adicionalmente, deve-se compreender que o modelo de curto prazo transpassa em grande parcela o uso de amostras de pó de perfuratriz, técnica esta já questionada por alguns pesquisadores, como Farias Junior (2010). Nesta etapa deve ser conduzidos mapeamentos de detalhe para auxiliar na detecção de variações geológicas locais não detectadas pelos modelos de blocos.

Este projeto também compilou valores da heterogeneidade constitucional calculados para outras tipologias de minério, em particular, um minério aurífero e outro bauxítico, com o intuito de considerar essa quantificação como indicativa das características geológicas gerais do depósito. Conforme apresentado nos resultados, os valores relativos à heterogeneidade constitucional para diferentes minérios indicam, de modo indireto, características como continuidade do depósito e distribuição de teores. Todavia, esta quantificação não torna menos necessária à compreensão das variabilidades e complexidades geológicas de um depósito mineral, apenas indicando tendências gerais desse depósito, mas que mesmo assim são interessantes.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves B.P. 1960. Distrito nióbio-titanífero de Tapira. Rio de Janeiro: *DNPM – Divisão de Fomento da Produção Mineral*, **80**: 41 p.
- Alwyn E., Annels A.E. 1991. *Mineral Deposit evaluation: a practical approach*. Chapman & Hall, (3ª edição) Grã Bretanha, 436 p.
- Arujo R.V.V., Sobra L.G.S., Santos L.C. 2002. Produção de Fosfato no Brasil: Complexo de Mineração Tapira/Fosfertil. *In*: XIX ENTMME, Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Recife, Pernambuco.
- Azzone R.G. & Ruberti E. (2010). Evolução Composicional do Filossilicatos do Perfil Intempérico do Complexo Ultramáfico Alcalino-carbonatítico de Catalão I (GO). *Revista do Instituto de Geociências- USP*. **10**, n. 2: 23-43.
- Bortoleto D.A., Chierigati A.C., Pereira A.H.R, Oliveira R.C. 2014 The application of sample theory in bauxite protocols. *REM. Revista Escola de Minas*. **67**: 215-220
- Brod J.A. 1990. Petrology and geochemistry of the Tapira alkaline complex, Minas Gerais State, Brazil. Tese de Doutorado, University of Durham, 486 p.
- Brod J.A., Gibson S.A., Thompson R.N., Junqueira-Brod T.C., Seer H.J., Moraes, L.C. de & Boaventura, G.R. 2000. The kamafugite-carbonatite association in the Alto Paranaíba igneous province (APIP) southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**: 404-408.
- Brod J.A., Ribeiro C.C., Gaspar J.C., Junqueira-Brod T.C., Barbosa E.S.R., Riffel B.F., Silva J.F., Chaban N., Ferrari A.J.D. 2004. Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalinos-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto do Parnaíba.
- Chierigati A.C. 2007. Reconciliação Pró-ativa em empreendimentos mineiros. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade e São Paulo, 203 p.
- Chierigati A.C., Pignatari L. E. C., Delboni JR. H. 2011. Novo modelo de reconciliação para indústria do ouro. *REM. Revista Escola de Minas* **64-2**: 237-243
- Cordeiro P.F.O., Brod J.A., Palmieri M., Oliveira C.G., Barbosa E.S.R., Santos R.V., Gaspar J.C., Assis L.C. 2011. The Catalão I niobium deposit, central Brazil: Resources, geology and pyrochlore chemistry. *Ore Geology Reviews*, **41**:112-121

- Cruz F.F. & Cheney T.M. 1976. Recursos de fosfato no complexo carbonatítico de Tapira, MG. *In*: SBG, Congr. Bras. Geologia, 29, Anais, p. 89-107.
- Frolov A.A. 1971. Vertical zonation in deposition of ore, as in ultrabasic-alkaline rocks and carbonatites. *International Geology Review*, v. **13**: 685-695
- Gibson S.A., Thompson R.N., Leonardos O.H., Mitchell J.G. 1995. The Late Cretaceous Impact of the Trindade mantle plume. Evidence from large volume mafic, potassic magmatism in SE, Brazil. *Journal of Petrology*, **36**:189-230,
- Gibson S.A., Thompson R.N., Weska R.K., Dickin A.P., Leonardos O.H. 1997. Late Cretaceous rift related upwelling and melting of Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil. *Contrib. Mineral Petrol.*, **126**: 303-314.
- Gomes C.B., Ruberti E. & Morbidelli I. 1990. Carbonatite complexes from Brazil: a review. *Journal of South American Earth Sciences*. **3**: 51-63.
- Grossi Sad J.H. & Torres N. 1971. Geologia e recursos minerais do complexo de Tapira – MG. Geologia e Sondagens Limitadas, Brasil, 68 p.
- Gy P.M. 1973. The sampling of broken ores – A review of principles and practice. *The Institution of Mining and Metallurgy, Geological, Mining and Metallurgical Sampling*, **1**: 194-205 e 261-263.
- Gy P. 1998. *Sampling for analytical purposes*. Translated by A. G. Royle, John Wiley & Sons, West Sussex. Champs (1ª edição), Inglaterra 400p.
- Isaaks E.H., Srivastava R. 1989. An Introduction to applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, 561 p.
- Junior F.A. 2010. Aprimoramento do Controle de Qualidade do Minério no Planejamento de Lavra de Curto Prazo: estudo de Caso. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade São Paulo, 140 p.
- Koyama I.K., Chierigati A.C., Eston S.M. 2009. Teste de Heterogeneidade como método de otimização de protocolos de amostragem. *Brasil Mineral*, **XXVII**: 63-68
- Leonardos O.H. 1956. Carbonatitos com apatita e pirocloro. Rio de Janeiro: *DNPM – Divisão de Fomento da Produção Mineral*, **81**: 30 p.
- Magalhaes M.M. & Lima A.C.P. 2002. *Noções de probabilidade e Estatística*. Edusp (4ª edição), São Paulo, 392 p.

Martins G.A. 2005. Estatística Geral e Aplicada. Atlas (3ª edição), São Paulo, 428 p.

Minnitt R.C.A., Rice P.M., Spangenberg C. 2007. Understanding the components of the fundamental sampling error: a key to good sampling practice. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **107**: 505-511.

Morteani G., & C. Preinfalk. 1996. REE distribution and REE carriers in laterites formed on the alkaline complexes of Araxá and Catalão (Brazil). In: Jones A.P., Wall F., Williams C.T (eds.) Rare earth minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits. Volume 7, Londres, Chapman and Hall, 227–255.

Oliveira S.M.B. & Imbernon R.A.L. 1998. Weathering and related REE in the Catalão I carbonatite complex, central Brazil. *J. of South America earth Sciences*, **11**: 379-388

Peroni R., Chieregati, A.C Câmara T., Kuckarts B., Pereira F.P., Leal R.S., Fontoura D.M., Raimundo R.F., Capponi L. Rabelo F.G.B. (2014). Projeto de Reconciliação para as Unidades de Mineração de Fosfato. In: Relatório Interno Vale Fertilizantes.

Pitard F.F. 1993. *Pierre Gy's Sampling Theory and Sampling Practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical control*. CRC, (3ª edição) Estados Unidos da América, 488 p.

Soubiés F., Melfi A.J., Autefage F. 1991. Comportamento Geoquímico dos elementos terras raras nos alteritos da jazida de fosfato e titânio de Tapira (Minas Gerais – Brasil): A importância dos fosfatos. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**: 3-16.

Revuelta M.B. Jimeno C.L. 1997. Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras. Entorno Gráfico S.L, (1 Edição) Madrid, 708p.

Thompson R.N., Gibson S.A., Mitchell J.G., Dickin P., Leonardos O.H., Brod J.A., Greenwood J.C. 1998. Migrating Cretaceous–Eocene magmatism in the Serra do Mar alkaline province, SE Brazil: melts from the deflected Trindade mantle plume? *J. Petrol.*, **39**: 1439–1526.

Vieira M.A.M. 1997. Complexo alcalino de Tapira, Minas Gerais: mineralogia e geoquímica da distribuição de terras raras no perfil de intemperismo. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências da UFMG, 95 p.

Wooley A.R. 1987. Alkaline Rocks and Carbonatites of the World: Part 1. North and South America. Grã Bretanha, 216p.

Yamamoto J.K. 2001. *Avaliação e Classificação de Reservas Minerais*. São Paulo, Edusp (1ª edição), 226 p.

Yegorov L.S. 1993. Phoscorites of the Maymecha–Kotuy ijolite–carbonatite association. *Int. Geol. Rev.* **35**: 346–358.

DOAÇÃO _____
IGC-USP
25 02 15

