

APLICAÇÃO DO ESTUDO DA COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DO CHUMBO A PROBLEMAS METALOGENÉTICOS: RESULTADOS PRELIMINARES PARA GALENAS DE DEPÓSITOS DO GRUPO BAMBUÍ

Por

GILBERTO AMARAL (1)

ABSTRACT

The zinc and lead deposits of the Bambuí Group resemble those of the Mississippi Valley. Tectonic evidence indicates that those deposits cannot be related to igneous activity or metamorphism, as proposed by previous authors. In order to throw some light on the problem of the origin of these deposits, we started a study on the isotopic composition of lead in galenas. Seven analyses were made on samples from Vazante, Itacarambí, Tiros and Funchal. With exception of the galenas from the first one (described in other paper from this annals), the others are clearly anomalous, yielding negative model ages. A straight line, with a slope of $0,200 \pm 0,041$, was obtained by plotting our results on a Pb^{206}/Pb^{204} vs. Pb^{207}/Pb^{204} graph. Applying the technique developed by RUSSEL and FARQUHAR (1960), BURGER et al. (1962) and others, an age of $2,500 \pm 500$ m.y. was obtained for the rocks that produced the radiogenic component of the anomalous lead, and an age of 600 ± 30 m.y. for the Vazante samples, which is in good agreement with the age of the Sete Lagoas Formation of the Bambuí Group (600 ± 22 m.y. by Rb-Sr measurements on shales), that encloses the deposits. The first value is roughly the average of the ages obtained for the basement rocks of the Bambuí Group, as indicated by K-Ar and Rb-Sr measurements. It is indicated that lead from the Vazant deposit was separated from a closed system containing U and Th, at the time of deposition of the Sete Lagoas Formation.

The above mentioned results support the point of view that the lead from the deposits of the Bambuí Group was remobilized from rocks of this Group and from the basement in variable amounts. Tectonic data indicate that this remobilization occurred during the Upper Cretaceous or Lower Tertiary. The great variation observed on the lead isotopic abundances does not support the hypothesis of a common sedimentary origin.

SUMARIO

De modo a esclarecer o problema da origem dos depósitos de chumbo e zinco, encaixados no Grupo Bambuí, iniciamos o estudo sobre a composição isotópica do chumbo em galenas de Vazante, Itacarambí, Tiros e Funchal, cujos resultados preliminares ora apresentamos. Com exceção do primeiro, os outros depósitos forneceram idades anômalas (negativas), indicando adição de chumbo radiogênico. Num gráfico com a razão Pb^{206}/Pb^{204} em abcissas e Pb^{207}/Pb^{204} em ordenadas, os resultados das análises dispõem-se aproximadamente sobre uma reta, cuja inclinação é $0,200 \pm 0,041$. Utilizando as técnicas de Russel e Farquhar (1960), Burger et al. (1962) e outros, obtemos uma idade de 2.500 ± 500 milhões de anos (m.a.) para as rochas que forneceram o chumbo radiogênico e uma idade de 600 ± 30 m.a. para a componente ordinária do chumbo anômalo. Este valor é a média das idades modelo obtidas para as galenas de Vazante, e concorda bastante bem com a idade obtida para a Formação Sete Lagoas do Grupo Bambuí, encaixante das mineralizações (V. Amaral e Kawashita, 1968). O primeiro valor representa a média aproximada das determinações Rb-Sr e K-Ar efetuadas até o momento em rochas do embasamento do Grupo Bambuí, em Minas Gerais, Goiás e Bahia. Os resultados indicam que o chumbo das galenas de Vazante separou-se de um sistema fechado contendo U e Th, na época da deposição da Formação Sete Lagoas.

Os dados acima concordam com a hipótese de que o chumbo dos depósitos do Grupo Bambuí foi remobilizado, em quantidades variáveis, de rochas deste Grupo e do embasamento. Dados tectônicos indicam que essa remobilização ocorreu durante o Cretáceo Superior ou Terciário Inferior, nos estágios finais da reativação wealdeniana. (Almeida 1967). A grande variação observada na composição isotópica do chumbo não concorda com a hipótese de uma origem sedimentar comum.

(1) Departamento de Engenharia de Minas Escola Politécnica, Universidade de São Paulo .

INTRODUÇÃO

Os estudos sobre a composição isotópica do chumbo em minerais de minério visam, primariamente, a determinação da idade da mineralização. Todavia, dependendo do modelo teórico usado, em alguns casos a idade obtida é menor do que aquela indicada por observações geológicas (até mesmo fornecendo valores negativos). Em raros casos a idade modelo é maior que aquela das rochas encaixantes. Todavia, em quaisquer dos casos, são obtidas importantes informações a respeito da origem dos depósitos. Com esta finalidade iniciamos os estudos sobre a composição isotópica do chumbo em galenas de depósitos encaixados no Grupo Bambuí, cujos resultados preliminares ora apresentamos.

Agradecimentos: O autor deseja expressar aqui os seus melhores agradecimentos ao Dr. Olavi Kouvo, do Serviço Geológico da Finlândia, pelas análises de galenas, bem como ao Prof. Dr. Geraldo C. Melcher e Geólogo Jorge S. Bettencourt, pelos contactos que permitiram a realização das mesmas.

Princípios Básicos

O chumbo natural é constituído de quatro isótopos: Pb^{204} , Pb^{206} , Pb^{207} e Pb^{208} . De todos, somente o primeiro não é radiogênico, os demais são produtos, respectivamente, da desintegração do U^{238} , U^{235} e Th^{232} . Dada a estabilidade do Pb^{204} , ele é usado como referência para a avaliação dos acréscimos sofridos pelos outros três, com o decorrer do tempo, por desintegração do U e Th. As equações que governam esses acréscimos são as seguintes:

$$x = x_0 + 137,8 V \left(e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t} \right) \quad (1)$$

$$y = y_0 + V \left(e^{\lambda' t_0} - e^{\lambda' t} \right) \quad (2)$$

$$z = z_0 + W \left(e^{\lambda'' t_0} - e^{\lambda'' t} \right) \quad (3)$$

onde: $x = Pb^{206}/Pb^{204}$, $y = Pb^{207}/Pb^{204}$, $z = Pb^{208}/Pb^{204}$, para um determinado instante t ; x_0 , y_0 e z_0 , são os correspondentes para t_0 . V é a relação U^{235}/Pb^{204} existente hoje, levando-se em conta que U^{238}/U^{235} é igual a 137,8 para o presente. W é a relação Th^{232}/Pb^{204} hoje. λ , λ' e λ'' são respectivamente

as constantes de desintegração do U^{238} , U^{235} e Th^{232} . Estas equações derivam da equação básica da desintegração radioativa:

$$N_0 = N \cdot e^{\lambda t} \quad (4)$$

onde, N é o número de átomos de um isótopo radioativo remanescente após um tempo t , N_0 é o número de átomos desse isótopo, existentes no início da experiência ($t=0$) e λ a constante de desintegração do isótopo. No caso mais simples de desintegração radioativa, onde um isótopo radioativo fornece apenas um isótopo radiogênico (como é o caso do U e Th), temos:

$$D = D_0 + N \left(e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t} \right) \quad (5)$$

onde, D é o número de átomos do isótopo radiogênico existentes no tempo t , D_0 é o número de átomos desse isótopo, já existentes no início da experiência ($t=0$) e N é o número de átomos do isótopo radioativo existente no momento da análise (t). No caso do estudo das abundâncias isotópicas em minerais, com finalidades geocronológicas, t_0 é a idade da formação mineral e t o momento da análise e portanto igual a zero (origem da escala cronogeológica). Desta maneira, a equação (5) torna-se:

$$D = D_0 + N \left(e^{\lambda t} - 1 \right) \quad (6)$$

onde t é a idade da formação do mineral. Esta equação é básica para o cálculo da idade de minerais que contém isótopos radioativos (por ex. K, Rb, U e Th). Devido à possibilidade de que no momento de sua formação o mineral incorpore uma certa quantidade do isótopo radioativo, trabalha-se normalmente com razões isotópicas, referidas a um determinado isótopo estável, como mostrado nas equações (1), (2) e (3). Além disso, esta maneira de tratar as abundâncias isotópicas é indispensável para a interpretação dos gráficos obtidos no espectrômetro de massas, o qual não determina diretamente o número de átomos dos diversos isótopos, mas sim razões isotópicas.

Na equação (5), N é sempre o número de átomos do elemento radioativo existente no presente. Se quisermos estudar as variações nas abundâncias isotópicas num intervalo de

tempo $t_0 - t_n$, simplesmente substituímos t por t_n na equação, permanecendo N constante. Isto nos daria o número de átomos do isótopo radiogênico existentes em t_n . Esta propriedade das equações de desintegração radioativa é indispensável para o estudo da abundância isotópica do chumbo em minerais isentos de U e Th, como é o caso da galena.

A interpretação das abundâncias isotópicas do chumbo é baseada nos seguintes princípios:

- 1 — Existiu um estágio inicial na história da Terra, caracterizado por uma homogeneidade da composição isotópica do chumbo. Este estágio corresponde à fase anterior a da formação da primeira crosta ou, mais precisamente ao momento da separação entre manto e crosta. A composição isotópica do chumbo nessa época é bem estabelecida com base em estudos efetuados em meteoritos, e caracteriza o **chumbo primeiro**. Esse momento (t_0) é o início da história geológica da Terra e seu valor mais preciso o situa há $4,55 \pm 0,03$ bilhões de anos (Murthy e Patterson, 1962);
- 2 — O único processo capaz de alterar a composição isotópica do chumbo primeiro é a adição de Pb^{206} , Pb^{207} e Pb^{208} , provenientes da desintegração do U e Th;
- 3 — Após a formação do mineral contendo chumbo, este não mais esteve associado a quantidades significantes de U e Th;
- 4 — Os isótopos do chumbo apresentam idêntico comportamento químico, o mesmo acontecendo com os isótopos do urânio, cuja relação U^{238}/U^{235} hoje é igual a 137,8.

Russel e Farquhar (1960) apresentam extensa discussão acerca dos princípios acima enumerados, motivo pelo qual deixamos de fazê-lo aqui, bem como de vários métodos para a datação de galenas. Dêstes, discutiremos apenas os de Holmes-Houtermans e Russel-Stanton-Farquhar, por serem os mais utilizados. Além disso, êstes modelos fornecem idades geralmente em concordância com a situação geológica dos depósitos, dependendo da escolha de um ou outro. Em muitos casos, principalmente para depósitos Pré-Cambrianos, não há diferença significativa entre as idades calculadas pelos dois métodos.

O modelo Holmes-Houtermans é baseado nos princípios 1 e 2 acima enumerados. Admitindo-se conhecidos os valores de x_0 , y_0 e t_0 das equações (1) e (2), as proporções de chumbo radiogênico (derivado somente por desintegração do urânio) adicionadas ao chumbo primordial serão, respectivamente, $x-x_0$ e $y-y_0$. Combinando-se as equações (1) e (2), levando-se em conta estas duas relações, temos:

$$\frac{x - x_0}{x - x_0} = \frac{137,8 \left(e^{\lambda' t_0} - e^{\lambda' t} \right)}{\left(e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t} \right)} \quad (7)$$

A equação (7) é a base de todo o método Holmes-Houtermans, ela mostra que todos os chumbos de mesma idade deverão fornecer pontos situados sobre uma mesma reta (isócrona), num gráfico Pb^{206}/Pb^{204} vs. Pb^{207}/Pb^{204} . As isócronas irradiam-se a partir do ponto correspondente ao chumbo primordial (x_0 , y_0). Na sua forma original, o modelo Holmes-Houtermans utilizava as seguintes constantes: $x_0 = 9,50$; $y_0 = 10,36$ e $t_0 = 4,5106 \cdot 10^9$ anos. Este último valor foi «ajustado» por Houtermans para fornecer idades mais consistentes a depósitos post-Cambrianos da Europa. Desde 1962, devido aos trabalhos de Murthy e Patterson (1962) sobre a composição isotópica do chumbo de meteoritos, são usados os seguintes valores: $x_0 = 9,56$; $y_0 = 10,42$; e $t_0 = 4,55 \cdot 10^9$ anos. Aplicando-se os mesmos à equação (7), as idades obtidas serão um pouco menores que aquelas fornecidas pelo modelo original (V. tabela 4.1 de Russel e Farquhar, 1960). Esta diferença não é muito importante nos depósitos Pr-Cambrianos, mas pode ser considerável nos depósitos jovens. Houtermans, estudando uma série de depósitos jovens, europeus e africanos, obteve para um grande número dêles uma idade não concordante com a situação geológica. Aos depósitos que forneciam idades mais novas, e até mesmo negativas, denominou tipo-J (Joplin) e aos que forneciam idades mais antigas, de tipo-B (Bleiberg). Com a modificação das constantes, vários depósitos do tipo-B fornecem idades mais adequadas. Os depósitos do tipo-J receberam adição de chumbo radiogênico, motivo pelo qual fornecem resultados absurdos. O chumbo dêstes depósitos é denominado **anômalo** e as técnicas para a interpretação de suas abundâncias isotópicas serão discutidas mais adiante.

O modelo Russell-Stanton-Farquhar, baseia-se fundamentalmente nas teorias de Stanton (1955) a respeito da origem dos depósitos do tipo concordante (conformable). Segundo este autor, depósitos sedimentares ricos em sulfetos (principalmente de ferro), durante a diagênese, sofreriam metassomatismo por soluções ricas em Pb, Zn e Cu, elementos estes derivados de vulcanismo vizinho. Desta maneira, formar-se-iam concentrações de galena, esfalerita, pirita e sulfetos de cobre, eventualmente com interesse econômico, do tipo concordante. Devido à associação com vulcanismo, o chumbo desses depósitos representaria uma amostra do chumbo existente no manto superior na época da deposição das rochas encaixantes. Além disso, admitem que o manto apresenta uniformidade nas relações U/Pb e Th/Pb, e que todo o chumbo de veios migrou através de rochas da crosta, existindo a possibilidade de que tenham assimilado chumbo radiogênico adicional e, portanto, adquirindo um caráter anômalo. Em consequência dessas suposições, todos os chumbos do tipo concordante deveriam apresentar relações isotópicas que, num gráfico Pb^{206}/Pb^{204} vs. Pb^{207}/Pb^{204} , caem sobre uma única curva de crescimento, conectando o chumbo primevo (x_0, y_0), numa extremidade, ao chumbo terrestre moderno (x_m, y_m), em outra. Analisando uma série de depósitos do tipo concordante, aqueles autores verificaram a validade de suas suposições, obtendo uma curva bastante homogênea, que continha o chumbo meteorítico numa das extremidades. Na intersecção dessa curva com a isócrona zero (determinada por análises em meteoritos com teóres variáveis em U e Th), determinaram os valores $x_m = 18,72$, $y_m = 15,82$, $V = 0,0659$ e $t_0 = 4,56.10^9$ anos. O modelo Russel-Stanton-Farquhar segue o caminho inverso àquele do modelo Holmes-Houtermans, pois parte da composição isotópica do chumbo terrestre moderno e regride ao passado. Desta maneira, as equações (1) e (2) transformam-se em:

$$18,72 = x_t + 137,8 \cdot 0,0659 (e^{\lambda t} - 1)$$

$$15,82 = y_t + 0,0659 (e^{\lambda' t} - 2)$$

ou:

$$x_t = 18,72 - 9,081 (e^{\lambda t} - 1) \quad (8)$$

$$y_t = 15,82 - 0,0659 (e^{\lambda' t} - 2) \quad (9)$$

Note-se que ambas as equações independem do valor t_0 , o que não acontece no modelo Holmes-Houtermans, no qual pequenas variações desse valor ocasionam grande imprecisão. Russell, Stanton e Farquhar preferem reunir as equações (8) e (9) sob uma forma x/y , que tem a grande vantagem de ser independente da quantidade medida de Pb^{204} , que dada a sua pequena abundância ocasiona um certo erro na determinação das razões Pb^{206}/Pb^{204} e Pb^{207}/Pb^{204} . A combinação das equações (8) e (9) resulta em:

$$\frac{x_t}{y_t} = 137,8 \left\{ \frac{3,063 - e^{\lambda t}}{241,2 - e^{\lambda' t}} \right\} \quad (10)$$

A equação (10) fornece uma idade denominada genericamente t_{6-7} . Os autores deste modelo apresentam uma outra alternativa para a obtenção de uma idade, somente que com base na relação Pb^{208}/Pb^{204} , aplicando uma modificação à equação (3), da mesma maneira que foi feito para a obtenção das equações (8) e (9). Com base no estudo de 17 galenas de depósitos concordantes, obtiveram os seguintes valores: $z_m = 38,80$ e $W = 34,2$, que aplicados à equação (3) resultam em.

$$z_t = 38,80 - 34,2 (e^{\lambda' t} - 1) \quad (11)$$

A equação (11) fornece a idade t_{8-4} do modelo Russel-Stanton-Farquhar. Qualquer modelo de datação de galenas, com base no Pb^{208} , encontrará sérias dificuldades devido à não homogeneidade do valor de W (Th^{232}/Pb^{204} , hoje). O desconhecimento desse valor, para o sistema que forneceu o chumbo contido numa galena, ocasiona grandes erros na determinação da idade. No caso dos isótopos provenientes da desintegração do urânio, o valor de V é anulado pela combinação das duas equações correspondentes, como foi feito para a obtenção das equações (7) e (10), básicas, respectivamente, para os modelos Holmes-Houtermans e Russell-Stanton-Farquhar.

Desde que as técnicas de análise isotópica atingiram uma precisão entre 1 e 0,1%, as maiores dificuldades para a datação de galenas reside na existência dos chumbos anômalos. Poucos, mas importantes, depósitos apresentam chumbo nitidamente anômalo, como por exemplo: Butte, Coeur D'Alene, Joplin, Broken Hill, Ivigtut, etc. O chumbo de Butte (Murthy e Patterson, 1961), Coeur D'Alene

(Long et al. 1960) e Ivigut (Ulrych, 1964), é do tipo-B, apresentando idades maiores que as indicadas por observações geológicas. No caso de Coeur D'Alene, por exemplo, os depósitos estão relacionados a intrusivas monzoníticas de idades Terciária, no entanto as idades modelo de galenas fornecem um valor de 1.400 m.a. Os monzonitos são intrusivos em rochas do Pré-Cambriano Superior, indicando que o chumbo dos depósitos foi remobilizado destas rochas. Interpretações deste tipo são feitas para os depósitos com chumbo do tipo-B e geralmente são argumentadas favoravelmente pela análise geológica regional. Os chumbos do tipo-J, únicos reconhecidos como anômalos por Russel e Farquhar (1960), são interpretados por meio de equações complexas, em conjunto com análise tectônica e geocronológica regional. Uma propriedade extremamente importante para a interpretação dos chumbos tipo-J é a de que, quando são feitas várias análises para um mesmo distrito ou província, os resultados dispõem-se aproximadamente sobre uma mesma reta, num gráfico Pb^{206}/Pb^{204} vs. Pb^{207}/Pb^{204} . A inclinação desta reta é dada pela equação:

$$R = \frac{y_r - y_0}{x_r - x_0} = \frac{(e^{\lambda' t_r} - e^{\lambda' t_0})}{137,8 (e^{\lambda t_r} - e^{\lambda t_0})} \quad (12)$$

onde: R é a inclinação da reta; x_r e y_r são, respectivamente, as relações Pb^{206}/Pb^{204} e Pb^{207}/Pb^{204} da componente radiogênica; x_0 e y_0 , as razões para a componente ordinária, t_r é a idade da rocha que forneceu a componente radiogênica e t_0 a idade da separação, de um sistema fechado contendo U, da componente ordinária. Por chumbo ordinário, entende-se aquele chumbo cuja abundância isotópica pode ser explicada por teorias simples (por exemplo, pelos modelos Holmes-Houtermans e Russell-Stanton-Farquhar). Nota-se, na equação (12) que sendo R conhecido, necessitamos do valor de t_r ou t_0 para resolvê-la. Às vezes, na província estudada, existem depósitos que contém somente chumbo ordinário, a partir do qual t_0 é obtida. Em outras, não ocorrem depósitos deste tipo, havendo necessidade de dados geocronológicos adicionais. Este último caso ocorre nos depósitos do Vale do Mississippi, estudados por Heyl et al. (1966), onde t_r é admitida igual à idade média do embasamento. Desta maneira, obtiveram $t_0 = 100$ m.a. (Cretáceo Médio a Superior), concordando com a hipótese de Behre et al. (1950). Tratamento

semelhante foi feito por Stacey et al. (1967) para galenas associadas à mineralização cuprífera de Bingham, Utah, onde $t_r = 1.630$ m.a. e $t_0 = 36$ m.a., este último valor concordando com a idade K-Ar das intrusivas associadas. Burger et al. (1962) apresentam um gráfico relacionando R, t_r e t_0 , muito útil para a resolução da equação (12). Três hipóteses são aventadas para explicar a formação dos chumbos anômalos, do tipo-J:

- 1 — O chumbo ordinário separou-se do manto na época t_0 e foi incorporado a rochas de idade t_r , que apresentavam a relação U/Pb muito maior que aquela do manto. Posteriormente, foi remobilizado e formou um mineral de chumbo;
- 2 — O chumbo ordinário separou-se do manto e incorporou-se a uma solução mineralizante. Esta, ao atravessar rochas antigas teria remobilizado chumbo radiogênico;
- 3 — O chumbo ordinário incorporou-se a rochas pobres em urânio, que repousam sobre rochas mais antigas. Posteriormente, soluções cortando os dois conjuntos de rochas, remobilizariam chumbo radiogênico das rochas antigas e chumbo comum das rochas mais novas. Este é o caso, por exemplo, de uma cobertura cratônica posteriormente reativada.

Resultados Preliminares para Galenas Do Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí constitui a cobertura sedimentar do Cráton do São Francisco. Este, é limitado em toda a sua extensão pelas faixas geossinclinais do Pré-Cambriano Superior — Paleozóico Inferior (500 ± 150 m.a.). A unidade basal do Grupo Bambuí, constituída de calcários com intercalações de folhelho, denominada Formação Sete Lagoas (Costa e Branco, 1961) foi datada por Amaral e Kawashita (1968) e é de idade Eocambriana (600 ± 22 m.a.). Com exceção de alguns complexos de rochas alcalinas, de idade Cretácea Superior — Terciária Inferior, localizados na extremidade SSW, o Grupo Bambuí não apresenta intrusões ígneas. Por sobre o Grupo Bambuí repousam arenitos de idade Cretácea, que em vários locais se apresentam cortados por falhas, indicando uma reativação tectônica, do tipo de plataforma, do Cráton do São Francisco. Os trabalhos de Almeida (1967 e 1968) mostram que essa reativação afetou toda a porção oriental do território brasileiro, incluindo a área de ocorrência do Grupo Bambuí.

Os depósitos de chumbo e zinco do Grupo Bambuí estão restritos à Formação Sete Lagoas. Todos, sem exceção, apresentam características comuns aos depósitos do tipo Vale do Mississippi, de acordo com os critérios enumerados por Ohle (1959). Robertson (1963) já havia reconhecido isto, para os depósitos do Município de Januária. Nenhum apresenta-se associado a rochas ígneas post-Bambuí, mas vários parecem estar relacionados a falhas post-Cretáceas. De modo a obter informações a respeito das condições de gênese desses depósitos, iniciamos o estudo sobre a composição isotópica do chumbo em galenas, nêles presente. Neste trabalho preliminar, apresentamos os resultados obtidos para os depósitos de Vazante, Itacarambí, Tiros e Funchal. A Tabela I mostra os resultados das análises.

Em outro trabalho destes anais apresentamos os resultados do estudo geológico de parte dos depósitos de Vazante. Robertson (1963) apresenta o estudo dos depósitos de Itacarambí. As ocorrências de Tiros e Funchal não foram ainda estudadas em detalhe. Ambas parecem estar relacionadas a grandes falhas de direção NE, responsáveis pelo alinhamento dos rios Indaiá, Abaeté, Borrachudo, Tiros, Funchal, etc., na porção oeste de Minas Gerais. O depósito de Tiros está encaixado num conglomerado calcífero, associado a folhelhos. A mineralização tem um nítido caráter

de preenchimento de cavidades, apresentando a seguinte sucessão paragenética: calcita-pirita (marcassita?) — calcita-galena. Não obtivemos amostras de galena em contato com a esfalerita, ambos apresentam-se em cristais centimétricos a decimétricos, perfeitos. Os arenitos da Formação Areado acham-se silicificados nas proximidades da ocorrência, indicando uma idade post-Cretáceo Inferior para a mineralização. A ocorrência da Fazenda Funchal está encaixada em calcários da Formação Sete Lagoas, aflorantes no Ribeirão Funchal, afluente do Rio Indaiá. Segundo informações do coletor (Luiz Paixão), a ocorrência é formada por pequenos veios cortando o calcário. A figura 1 mostra a localização dessas ocorrências.

Analisando-se os resultados da tabela I em função dos princípios teóricos anteriormente discutidos, observa-se que, com exceção de Vazante, todos os depósitos apresentam chumbo anômalo do tipo-J. As idades calculadas, por exemplo pelo modelo Holmes-Houtermans modificado, são: Itacarambí 1 : — 800 m.a.; Itacarambí 2 : — 700 m.a.; Tiros : — 650 m.a. e Funchal : — 150 m.a. O mesmo ocorre se aplicarmos o modelo Russel-Stanton-Farquhar. O chumbo de Vazante é nitidamente ordinário, fornecendo uma idade de

TABELA I

Localização	Pb ²⁰⁶ /Pb ²⁰⁷	Pb ²⁰⁶ /Pb ²⁰⁴	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁴	Pb ²⁰⁸ /Pb ²⁰⁴
V1 - Vazante, galeria G-2, 60 m	1,129	17,85	15,81	37,39
V2 - Vazante, Gruta do Urubú.	1,131	17,68	15,62	37,06
V3 - Vazante, Serra do Ouro Podre.	1,134	17,64	15,56	37,06
11 - Itacarambí. Mina Grande.	1,261	20,30	16,10	40,90
12 - Idem.	1,256	20,54	16,36	41,56
T - Tiros, Rapadura.	1,236	19,60	15,85	38,87
F - Faz. Funchal.	1,198	19,06	15,90	38,99

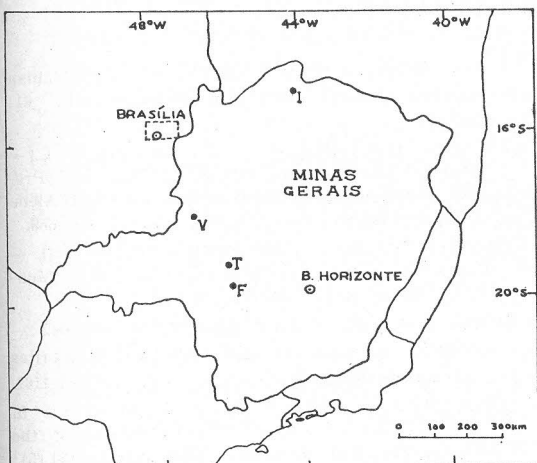


Figura 1 — Mapa de localização dos depósitos estudados: V = Vazante, I = Itacarambi, T = Tiros e F = Fazenda Funchal.

600 $\pm$ 30 m.a. pelo método Russel-Stanton-Farquhar, ou 570 $\pm$ 30 m.a. pelo método Holmes-Houterman modificado. Estes valores concordam notavelmente com a idade da formação Sete Lagoas (600 $\pm$ 22 m.a.) obtida por Amaral e Kawashita (1968), indicando que o chumbo de Vazante é do tipo ordinário e separou-se de um sistema fechado (provavelmente o manto) na época da deposição do Grupo Bambuí. A figura 2 mostra o gráfico Pb^{206}/Pb^{204} vs. Pb^{207}/Pb^{204} , com os pontos correspondentes às nossas análises. Estão também representadas as isócronas 1,0 b.a., zero e -1,0 b.a. do modelo Holmes-Houtermans e a curva de crescimento dos chumbos concordantes, segundo

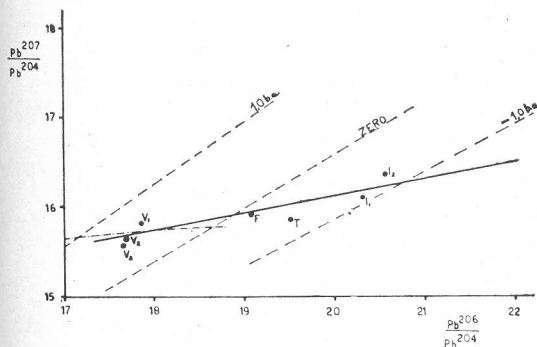


Figura 2 — Gráfico Pb^{206}/Pb^{204} vs. Pb^{207}/Pb^{204} com os pontos representando as amostras analisadas. A linha cheia representa a reta que melhor satisfaz os pontos. As linhas tracejadas são as isócronas do modelo Holmes-Houtermans modificado e a linha em ponto-trazo é a curva de crescimento dos chumbos concordantes, do modelo Russel-Stanton-Farquhar. V = amostras de Vazante; F = amostra da Fazenda Funchal; T = amostra de Tiros e I = amostras de Itacarambi.

o modelo Russel-Stanton-Farquhar. Nota-se também, que os pontos estão aproximadamente alinhados segundo uma reta cuja inclinação, calculada por mínimos quadrados, é $0,200 \pm 0,041$.

Aplicando-se a equação (12), e com o auxílio do gráfico de Burger et al. (1962), obtêm-se os seguintes valores para t_r e t_0 :

t_r . 10 ⁶ anos	t_0 . 10 ⁶ anos
1.800	1.800
2.000	1.600
2.180	1.400
2.300	1.200
2.420	1.000
2.540	800
2.650	600
2.720	400
2.800	200
2.880	0

Devido ao fato de o chumbo de Vazante ser nitidamente ordinário e fornecer uma idade modelo consistente com a situação geológica, fica evidenciado um valor para t_r da ordem de 2.650 m.a. Estudos em andamento no Centro de Pesquisas Geocronológicas da Universidade São Paulo, vem demonstrando que as rochas do embasamento do Grupo Bambuí, em Minas Gerais, Bahia e Goiás, apresentam idades variáveis entre 1.900 e 3.000 milhões de anos. Assim, o valor obtido para t_r representa grosseiramente a média daquelas idades, indicando que o chumbo de Itacarambi, Tiros e Funchal foi remobilizado, em proporções variáveis, tanto de rochas do Grupo Bambuí como do embasamento. É importante notar que t_r representa a idade das rochas que forneceram a componente radiogênica, na época da remobilização. Isto é extremamente importante, pois sugere que a mineralização é um fenômeno recente, concordando com a nossa opinião de que ela está relacionada à reativação tectônica que afetou o Grupo Bambuí no Cretáceo Superior ou Terciário Inferior. A grande variação observada na composição isotópica do chumbo, não está de acordo com a hipótese de que estes depósitos tenham uma origem primariamente sedimentar, como sugerido por Cassedanne (1968).

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F. F. M. de — 1967 — Origem e evolução da Plataforma Brasileira. Bol. Div. Geol. Min. D.N.P.M. (241): 36 p.
- 1968 — Evolução tectônica do Centro-oeste brasileiro no Proterozóico superior. Simpósio sobre o Manto Superior — Acad. Bras. Ciên. no prelo.
- AMARAL, G. e KAWASHITA, K. — 1968 — Idade do Grupo Bambuí por determinações Rb-Sr em folhelhos. Anais do XXIº Congr. Bras. Geol. No prelo.
- BEHRE JR., C. H.; HEYL JR., A. V. e Mc KNIGHT, E. T. — 1950 — Zinc and lead deposits of the Mississipp Valley. Proceedings XVIII th Int. Geol. Congr., London. Part VII: 51-59.
- BURGER, A. J.; NICOLAYSEN, L. O. e VILLIERS, J. W. L. de — 1962 — Lead isotopic compositions of galenas from the Witwatersrand and Orange Free State, and their relation to the Witwatersrand and Dominion Reef uraninites. Geoch. et Cosmoch. Acta, 26: 25-59.
- CASSEDANNE, J. — 1968 — Contribution a l'etude des calcaires de Bambuí: Microfacies et analyses des formations carbonatées encaissant les gites de plomb et zinc bresiliens. Bol. Inst. Geociên. Univ. Fed. Rio de Janeiro. (2): 35-61.
- COSTA, M. T. e BRANCO, J. J. R. — 1961 — Roteiro para a excursão Belo Horizonte — Brasília, Introdução. Publ. Inst. Pesq. Radioat. Belo Horizonte. (15): 9-68.
- HEYL, A. V.; DELEVAUX, M. H.; ZARTMAN, R. E. e BROCK, M. R. — 1966 — Isotopic study of galenas from the Upper Mississippi Valley, the Illinois-Kentucky, and some Appalachian Valley Mineral Districts. Econ. Geol., 61: 933-961.
- LONG, A.; SILVERMAN, A. J. e KULP, J. L. — 1960 — Isotopic composition of lead and Precambrian mineralization of the Coeur D'Alene District, Idaho. Econ. Geol., 55 (4): 645-658.
- MURTHY, V. R. e PATTERSON, C. — 1961 — Lead isotopes in ores and rocks of Butte, Montana. Econ. Geol., 56 (1): 59-67.
- MURTHY, V. R. e PATTERSON, C. — 1962 — Primary isochron of zero age for meteorites and the Earth. Jour. Geoph. Res., 67: 1161-1167.
- OHLE, E. L. — 1959 — Some considerations in determining the origin of ore deposits of the Mississippi Valley type. Econ. Geol., 54 (5): 769-789.
- ROBERTSON, J. F. — 1963 — Geology of the lead-zinc deposits in the Município de Januária, State of Minas Gerais, Brazil. Bull. U.S.G.S. (1110-B): 110 p.
- RUSSEL, R. D. e FARQUHAR, R. M. — 1960 — Lead isotopes in geology. Interscience, N. York, 243 p.
- STACEY, J. S.; MOORE, W. J. e RUBRIGHT, R. D. — 1967 — Precision measurements on lead isotope ratios: Preliminary analyses from the U. S. Mine, Bingham Canyon, Utah. Earth and Plan. Sci. Letters, 2 (5): 489-499.
- STANTON, R. L. — 1955 — The genetic relationship between limestone, volcanic rocks and certain ore deposits. Austral. Jour. Sci., 17: 173.
- ULRYCH, T. J. — 1964 — The anomalous nature of Ivigtut lead. Geoch. et Cosmoch. Acta, 28: 1389-1396.