

MÉTODO DE DATAÇÃO RADIOMÉTRICA APROXIMADA DE UM CONDRILO COMUM UTILIZANDO O SISTEMA ISOTÓPICO Pb^{206} - Pb^{207} ATRAVÉS DE ANÁLISE QUÍMICA DE MICROSSONDA ELETRÔNICA DE PLAGIOCLÁSIOS METAMÓRFICOS

APPROXIMATE RADIOMETRIC DATING METHOD FOR A COMMON CHONDRITE USING THE Pb^{206} - Pb^{207} ISOTOPIC SYSTEM BY ELECTRON MICROPROBE CHEMICAL ANALYSIS OF METAMORPHIC PLAGIOCLASES

Ricardo GAZILLO NETO

Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici – Bloco 912. Fortaleza – CE.
E-mail: paleozoic.neto@gmail.com

Introdução
Material e Métodos
Resultados e Discussões
Datação Pb-Pb dos plagioclásios
Conclusão
Referências

RESUMO - Condritos comuns são meteoritos que quando submetidos a metamorfismo termal desenvolvem minerais de recristalização como o plagioclásio que contém a composição da matriz condritica original. A matriz de um condrito carbonáceo primitivo pode ser considerada complementar de um condrito comum ou não carbonáceo o que permite analisar o fracionamento de elementos traço de um reservatório geoquímico para outro. Quantidades de chumbo foram analisadas por microsonda eletrônica no condrito comum Campos Sales (L5) e essas quantidades foram utilizadas para datar os plagioclásios através da correlação das suas concentrações de Pb com as razões isotópicas Pb^{206}/Pb^{204} e Pb^{207}/Pb^{204} do condrito carbonáceo Allende através do conceito de fracionamento geoquímico e cosmoquímico do elemento Pb. Os dados estatísticos gerados foram utilizados para obter a idade aproximada do metamorfismo dos plagioclásios do Campos Sales através do sistema isotópico Pb^{206} - Pb^{207} . O método aqui demonstrado de datação química fornece uma idade com grande margem de erro de 652 Ma devido à precisão próxima do limite de detecção para os elementos traço na microsonda eletrônica e às considerações feitas sobre fracionamento geoquímico, mas apresenta-se consistente em relação aos resultados esperados para a idade dos condritos.

Palavras-chave: Microsonda eletrônica, Fracionamento geoquímico, Metamorfismo, Datação aproximada, Sistema isotópico Pb^{206} - Pb^{207} .

ABSTRACT - Ordinary chondrites are meteorites that when submitted to thermal metamorphism develops minerals by recrystallization like plagioclase that contains the original composition of the chondritic matrix. The matrix of a primitive carbonaceous chondrite can be considered complementary of the ordinary chondrites or non carbonaceous chondrites which permit to analyze the trace element fractionation of a geochemical reservoir to another one. Quantities of lead were analyzed by electron microprobe on the chondrite Campos Sales (L5) and these quantities were utilized to date the plagioclases through the correlation of the Pb concentrations with the isotopic ratios Pb^{206}/Pb^{204} and Pb^{207}/Pb^{204} of the carbonaceous chondrite Allende through the concept of geochemical and cosmochemical fractionation of the element Pb. The generated statistical data were used to obtain the approximate age of metamorphism of the plagioclases of the Campos Sales through the isotopic system Pb^{206} - Pb^{207} . The demonstrated method here of chemical dating gives an age with a great error range of 652 Ma due to the precision near the detection limit of trace elements in the electron microprobe and to considerations done about geochemical fractionation, but it presents consistent with relation to the expected results for the age of the chondrites.

Keywords: Electron microprobe, Geochemical fractionation, Metamorphism, Approximate dating, Pb^{206} - Pb^{207} isotopic system.

INTRODUÇÃO

Análises de microsonda eletrônica em fases minerais de uma rocha específica podem conter percentuais de elementos traço que possuem isótopos importantes para datação da rocha. Sem dados isotópicos referentes à rocha não há muito a se fazer para se produzir resultados de geocronologia a partir da química mineral. No entanto, um método de correlacionar concentrações de elementos traço, onde o elemento aqui considerado é o chumbo (Pb), pode ser feito se dados forem extraídos de uma

rocha que represente um reservatório geoquímico próximo da composição da rocha de onde não há nenhum tipo de dado isotópico, apenas análise química. Um método de datação química utilizando medidas de microsonda eletrônica já é aplicado com sucesso no caso de monazitas para o sistema isotópico U-Pb, onde tal método está apresentado em Montel et al. (1996).

A relação existente entre condritos carbonáceos e condritos comuns é bem próxima de um *trend* que envolve a condensação

cosmoquímica dos elementos. Condritos carbonáceos são enriquecidos em elementos voláteis (de baixa temperatura de condensação) e condritos não carbonáceos são enriquecidos em elementos refratários, mas a média de composição para o Sistema Solar representa um reservatório condritico semelhante ao dos condritos carbonáceos não alterados por reações de baixa temperatura envolvendo moléculas de água. Isto quer dizer que condritos não carbonáceos possuem composições químicas que seguem um padrão de fracionamento de elementos voláteis. O chumbo é o elemento traço que possui a menor temperatura de condensação cosmoquímica dentre todos os metais (Lodders, 2003). Portanto, este apresentará um padrão pronunciado de fracionamento entre condritos carbonáceos e não carbonáceos.

Também este possui alta mobilidade geoquímica o que significa que condritos não carbonáceos metamorfizados possuirão altas concentrações de Pb nas fases minerais cristalizadas durante metamorfismo termal devido à grande difusão do íon Pb^{2+} . O plagioclásio é o mineral metamórfico mais

comum nos condritos e este representa a matriz vítrea, a mesostasis, recristalizada o que significa que a mesostasis partilha de semelhanças genéticas com a matriz dos condritos carbonáceos, especialmente os condritos tipo CV. Dois condritos foram considerados aqui para representarem o reservatório condritico carbonáceo: Allende e Vigarano. Os dados de concentração de Pb e suas respectivas razões isotópicas foram obtidos a partir do condrito Allende (Arden, 1983).

A correlação entre os dados isotópicos obtidos para o condrito Allende foi feita para se datar o condrito não carbonáceo Campos Sales (L5), (Scorzelli et al., 1998), utilizando apenas os dados de química mineral das análises de seus grãos de plagioclásio. O método apresentado aqui, portanto, é o de datação aproximada utilizando o sistema isotópico Pb-Pb valendo-se apenas dos dados obtidos de PbO (wt%) dos plagioclásios e extraindo dados isotópicos do condrito Allende considerando-o o reservatório condritico que foi fracionado para gerar o condrito não carbonáceo e metamorfizado (Kessel et al., 2007).

MATERIAL E MÉTODOS

As análises de microsonda eletrônica foram realizadas pelo equipamento *Jeol Electron Probe Microanalyzer* modelo JXA-8230, no laboratório CRTI da Universidade Federal de Goiás, operando com uma voltagem de 15 kV com um feixe de elétrons de 20 nA com um tempo médio de análise de 10 a 30 segundos dependendo da abundância do elemento químico em cada fase mineral analisada. A rocha utilizada no método proposto é um condrito comum denominado Campos Sales classificado como L5 de acordo com Scorzelli et al. (1998), uma lâmina delgada polida desse meteorito foi submetida às análises da microsonda eletrônica.

Foram realizadas 10 medidas de grãos de plagioclásio sódico contendo níveis detectáveis de PbO. Gráficos de funções de regressões estatísticas

e seus respectivos valores foram obtidos utilizando o software GeoGebra versão 3.0.5. Dados da composição química dos condritos carbonáceos Allende e Vigarano foram extraídos de McSween & Richardson (1977) para a comparação com a química mineral do condrito estudado; dados da concentração de Pb (ppb) e suas respectivas razões isotópicas Pb^{206}/Pb^{204} e Pb^{207}/Pb^{204} foram extraídos de Arden (1983) para a correlação com a concentração de Pb no Campos Sales e tais dados isotópicos forneceram os resultados para a determinação da sua idade aproximada. Os erros estatísticos na isócrona Pb-Pb do Campos Sales foram calculados a partir dos valores esperados para a inclinação da isócrona e idade do condrito Allende de acordo com os resultados apresentados por Arden (1983).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Determinação do fracionamento químico de Pb no plagioclásio

Considerando a composição ideal de um condrito primitivo pouco metamorfizado, sem alteração aquosa e contendo razoavelmente a concentração dos elementos metálicos voláteis semelhante ao SAD (*Standard Average*

Distribution), (Anders & Ebihara, 1982), é possível traçar a evolução por fracionamento teórico de um condrito comum (por exemplo, L3 – L5) a partir de um condrito carbonáceo tipo CV.

O chumbo é um elemento químico com a temperatura de condensação cosmoquímica mais

baixa dentre todos os metais da Tabela Periódica sendo condensado a partir da nebulosa solar com uma temperatura média de 727 K (Lodders, 2003). Em comparação, elementos refratários como Ca, Al e Ti condensam a partir do gás da nebulosa solar em temperaturas da ordem de 1750 K. Sendo assim, este é considerado um elemento volátil que facilmente é mobilizado durante eventos termais. Considerando um reservatório condrítico tipo CV com a composição representada aqui pelos condritos Allende e Vigarano, fazendo esse reservatório teoricamente aquecer e vaporizar, os produtos de condensação serão enriquecidos em elementos refratários.

O Pb presente na condição inicial tem sua concentração reduzida na matriz de um condrito não carbonáceo. O segundo estágio de fracionamento do Pb é a difusão iônica através de metamorfismo termal no condrito não carbonáceo. O metamorfismo induzirá recristalização da matriz condrítica original e elementos traço voláteis como K, Mn e Pb que estão empobrecidos na matriz em relação aos condritos CV, se difundirão mais facilmente para as fases minerais que estão crescendo a partir da recristalização metamórfica. Como consequência, minerais neoformados no condrito metamorfozido como apatita, merrillita e plagioclásio terão enriquecimento de elementos voláteis em relação à matriz original não metamorfozida e também em relação à matriz dos condritos CV.

Como consequência, o resultado global é o enriquecimento em Pb nas fases minerais metamórficas em relação à matriz dos condritos CV. Isso acontece porque tais elementos embora mais concentrados nos condritos CV do que nos condritos não carbonáceos, existem em maior concentração em fases minerais metamórficas e, em contrapartida, permanecem diluídos na matriz dos condritos tipo CV. Baseando-se nesse conceito, o fracionamento de chumbo partindo-se de um reservatório condrítico carbonáceo para um reservatório condrítico não carbonáceo e metamorfozido é dado pela equação (1).

$$[Pb]_{CNC} = [Pb]_{CV} + k[Pb]_{CV} \quad (1)$$

Onde $[Pb]_{CNC}$ é a concentração de Pb numa fase mineral metamórfica do condrito não carbonáceo, $[Pb]_{CV}$ é a concentração de Pb na matriz dos condritos CV e k é a média aritmética da razão entre os pesos percentuais dos

elementos químicos traços presentes nos condritos CV e os pesos percentuais medidos na fase mineral neoformada do condrito comum como parâmetro da matriz dos meteoritos. A equação (1) contém o efeito da difusão iônica implícita dada pelo sinal positivo da fórmula. O parâmetro k é dado pela equação (2).

$$k = \frac{1}{n} \sum \frac{CNC (wt\%)}{\frac{1}{2} \sum CV (wt\%)} \quad (2)$$

Onde “n” é a quantidade de elementos medidos pela microsonda eletrônica, o número fracionário $\frac{1}{2}$ é devido a existirem duas medidas de dois condritos CV (Allende e Vigarano) e CNC (wt%) são as medidas de microsonda eletrônica dos elementos traço/menores presentes na fase mineral metamórfica no CNC (condrito não carbonáceo). O fracionamento do Pb leva em consideração todos os seus isótopos, principalmente os isótopos radiogênicos dos sistemas U^{238} - Pb^{206} e U^{235} - Pb^{207} . Medidas das razões isotópicas normalizadas Pb^{206}/Pb^{204} e Pb^{207}/Pb^{204} foram realizadas e correlacionadas com as concentrações de Pb total, em ppb, na matriz do condrito carbonáceo Allende (Arden, 1983). Esses dados são extremamente valiosos porque correlacionam dados que são obtidos com química mineral com dados de razões isotópicas importantes para geocronologia. Os resultados obtidos por Arden (1983) são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Correlação da concentração total de chumbo com os respectivos valores dos isótopos radiogênicos de chumbo na matriz do condrito carbonáceo Allende. Dados extraídos de Arden (1983).

Amostragem	Pb (ppb)	Pb^{206}/Pb^{204}	Pb^{207}/Pb^{204}
5	16,84	9,871	10,692
6	445,3	9,896	10,673
7	144,3	10,029	10,744
8	325,8	10,039	10,768
9	208,4	10,105	10,811
10	35,52	10,336	10,933
11	23,57	13,753	13,013
12	6,29	15,364	14,053
13	3,33	14,448	13,509
14	3,76	14,772	13,788
15	3,57	14,699	13,763
16	12,12	21,506	17,899
17	1,98	23,724	19,279

O condrito não carbonáceo Campos Sales (L5) é um condrito metamorfozido, (Kessel et al., 2007; Scorzelli et al., 1998), de alto grau contendo cristais de plagioclásio metamórfico

cujos percentuais de PbO foram determinados por análises de microsonda eletrônica. Utilizando a informação do condrito Allende e aplicando o fracionamento proporcional de Pb teórico para o plagioclásio é possível determinar com um grau de certeza razoável a idade de metamorfismo desse condrito.

As razões isotópicas determinadas são sensíveis aos valores de concentração de Pb, onde assume-se que mantêm-se as proporções isotópicas de Pb de tal forma que os valores listados na figura 1 em ppb podem ser simplesmente considerados, quando aplicado a equação (1), valores em ppm, mantendo-

se as devidas proporções. Efeitos de contaminação por Pb terrestre no condrito Allende foram desconsiderados aqui devido à baixa precisão do método já existir com respeito aos níveis de Pb próximos do limite de detecção nas análises dos plagioclásios, além do que ambos os meteoritos são quedas e foram submetidos a pouca alteração terrestre.

A tabela 2 lista os valores médios da composição do plagioclásio e a relação com a matriz dos condritos Allende e Vigarano (McSween & Richardson, 1977).

Tabela 2 - Correlação da composição da matriz dos condritos carbonáceos Allende e Vigarano com a composição média do plagioclásio no condrito Campos Sales. A última coluna mostra a razão de semelhança entre as composições, o que será o fator importante no cálculo do fracionamento de chumbo no plagioclásio.

Componentes (%)	Allende ^a (matriz)	Vigarano ^a (matriz)	Campos Sales (plagioclásio)	Razão k ($\Sigma/2)/(CS)$
Na₂O*	0,22	0,49	7,63	21,4929577
MgO	20,2	17,1	0,19	0,01018767
Al₂O₃*	2,30	4,27	21,56	6,56316591
SiO₂*	28,0	28,3	67,42	2,39502664
SO₃	2,82	0,51	-	-
K₂O*	0,01	0,05	1,09	36,3333333
CaO	2,37	1,53	2,16	1,10769231
TiO₂	0,09	0,09	0,04	0,44444444
Cr₂O₃	0,38	0,40	-	-
MnO	0,21	0,14	0,02	0,11428571
FeO	31,9	32,6	0,54	0,01674419
NiO	1,83	1,39	-	-
TOTAL	90,33	86,87	100,65	Média = 0,33867

* Elementos que não são considerados no cálculo da média da razão porque são elementos principais do plagioclásio sódico sendo elementos abundantes e não elementos traço; a - McSween & Richardson (1977)

A tabela 2 indica um fracionamento dos elementos maiores no Campos Sales em relação à matriz dos condritos carbonáceos CV, esse desvio dado pelo fracionamento tem o valor médio de $k = 0,33867$. Isto quer dizer que os valores do elemento chumbo dados pela tabela 1 devem ser corrigidos para os valores que existirão aproximadamente no plagioclásio do Campos Sales aplicando essa média de desvio composicional como parâmetro de correção.

Partindo do princípio que o fracionamento de chumbo no plagioclásio do condrito não dependeu de outros fatores a não ser a difusão iônica gerada por metamorfismo, mas que conservou a composição original de sua mesostasis, a equação de correção dos valores de chumbo da tabela 1 são dados pela expressão que depende do desvio composicional calculado na tabela 2. Esse fracionamento é considerado cosmoquímico, os condritos carbonáceos se formaram a distâncias maiores do protossol e

fracionaram muito mais elementos moderadamente voláteis como o chumbo.

É de se esperar que o chumbo, um elemento cosmoquimicamente volátil, esteja presente em uma concentração menor em condritos comuns, que fracionam muito mais elementos refratários. No entanto o plagioclásio aqui é um mineral metamórfico que cresceu a partir da matriz enriquecida em elementos voláteis, logo o íon Pb^{2+} tem grande mobilidade e espera-se que este tenha sido fracionado para as fases de recristalização devido ao seu alto potencial de difusão iônica. Sendo assim, os plagioclásios estão enriquecidos em Pb em relação à matriz dos condritos carbonáceos. A expressão matemática empírica que calcula o fracionamento médio de chumbo de acordo com os resultados da tabela 2 é escrita de acordo com a equação (1) que é:

$$[Pb]_{Campos\ Sales} \approx Pb_{Allende} + 0,33867 Pb_{Allende} \quad (3)$$

Onde [Pb] é a concentração de chumbo

existente nos condritos aqui considerados. Resolvendo a equação para todos os valores listados na tabela 1 obtêm-se os valores teóricos para a concentração de chumbo total especificamente da mesostasis recristalizada do Campos Sales, porque exclui-se valores dos elementos fracionados pela olivina e piroxênio. Aqui se considera o fato de que a maior parte da mesostasis intracôndrulo recristalizou se convertendo em plagioclásio sódico. A partir dos dados gerados, pode-se calcular por regressão estatística uma função que relaciona a concentração de chumbo total do plagioclásio/mesostasis com as respectivas razões isotópicas de chumbo. Visto que há dois isótopos radiogênicos de chumbo representando os isótopos de U^{238} e U^{235} , existirão duas funções de

regressão.

A função que mais se ajusta aos dados foi gerada por regressão de potência. Os gráficos que relacionam as concentrações de chumbo em “ppm” e suas respectivas razões isotópicas são mostrados a seguir (Figura 1). Os valores dados pelas duas funções representam os resultados aproximados das respectivas razões isotópicas Pb^{206}/Pb^{204} e Pb^{207}/Pb^{204} para os condritos. A relação existente entre os condritos CV e o Campos Sales (L5) é basicamente de fracionamento dos elementos em termos de volatilidade de acordo com o modelo de condensação dos elementos a partir de uma nebulosa com composição solar adicionado ao efeito de difusão iônica de Pb^{2+} durante o metamorfismo termal.

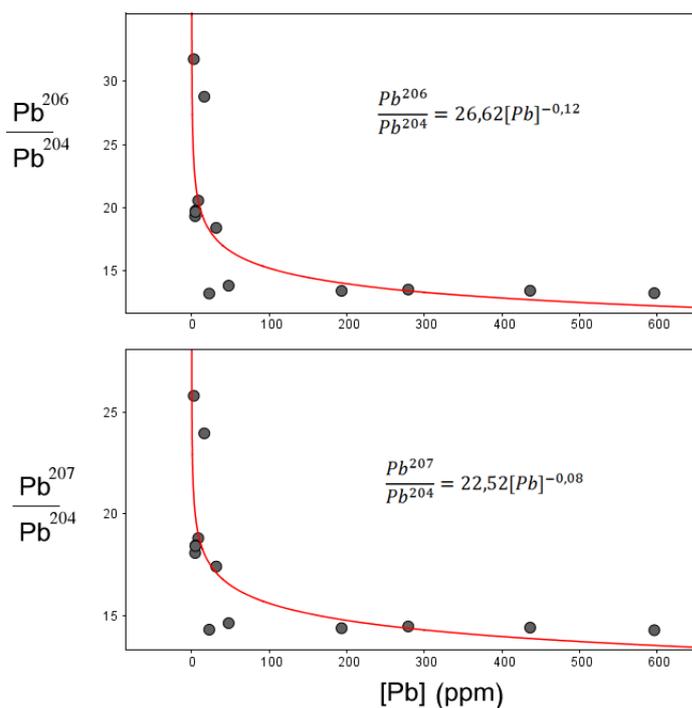


Figura 1 - Gráficos das funções de potência que correlacionam a concentração média de chumbo num condrito L5 (valores corrigidos a partir dos dados gerados para o condrito carbonáceo Allende) com os valores das respectivas razões isotópicas de chumbo.

Detalhes sobre a difusão de chumbo no plagioclásio durante eventos térmicos são tratados em Cherniak (1995), uma das informações apresentadas por esse autor é que a concentração de Pb no plagioclásio e K-feldspato é menos sensível à fracionamentos isotópicos o que implica em as razões isotópicas de Pb não precisarem de correções normalmente feitas para minerais que fracionam os elementos urânio e chumbo. A correlação também é explicada pela extração dos elementos existentes na nebulosa solar que são compatíveis com uma matriz condrítica.

O fracionamento isotópico deve ser considerado no caso dos meteoritos tanto quanto no das rochas terrestres, por isso faz-se necessário utilizar-se de mais de um exemplo de razões isotópicas medidas de forma precisa para outros meteoritos e compará-los entre si e com o resultado aqui obtido (Patterson & Brown, 1953; Marshall, 1962), sendo o mais importante o fracionamento devido à temperatura de condensação do chumbo que está em torno de 727 K (Lodders, 2003).

A partir das conclusões de Patterson (1956) o meteorito Canyon Diablo é considerado o

reservatório isotópico de chumbo mais antigo, contendo as menores razões isotópicas conhecidas.

Todos os materiais que possuem a idade do Sistema Solar devem plotar na reta que é determinada pela razão isotópica do Canyon Diablo e diversos outros meteoritos.

Dados isotópicos mais precisos foram obtidos por Tatsumoto et al. (1973) que fornece os seguintes valores: troilita do Canyon Diablo ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 9,307$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 10,294$), Odessa ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 9,995$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 10,691$), Murray (C2) ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 9,806$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 10,594$), Allende (C3) ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 11,250$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 11,451$), Modoc (L6) ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 41,308$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 29,788$), Plainview (H5) ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 13,682$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 12,958$). Portanto, valores de razões isotópicas entre o Canyon Diablo e Modoc serão considerados válidos para condritos L5.

Datação Pb-Pb dos plagioclásios

O valor da concentração média de Pb no plagioclásio do condrito CS foi obtido por análise de microsonda eletrônica. Foram analisados 10 pontos de plagioclásio sódico contendo níveis detectáveis de Pb (Tabela 3).

Tabela 3 - Análises de microsonda eletrônica de grãos de plagioclásio sódico e proporção de cátion Pb^{2+} / composição molar do plagioclásio no condrito e de dois padrões utilizados e os resultados químicos.

Análise do Plagioclásio	PbO (wt%)	Pb (cátion/molécula)
Padrao_Ortoclasio H2	0.02	-
Padrao_AN100_A2	0.02	-
PL01	0.02	0.0007036
PL02	0.02	0.0006858
PL03	0.02	0.0007940
PL04	0.01	0.0004966
PL05	0.03	0.0011987
PL06	0.02	0.0006420
PL07	0.01	0.0004088
PL08	0.04	0.0017627
PL09	0.02	0.0007329
PL10	0.03	0.0011319

Tabela 4 - Valores obtidos para a concentração e razões isotópicas de chumbo no meteorito Campos Sales de acordo com a proporção de cátions/molécula dada pelas análises de microsonda. Razões isotópicas obtidas a partir das funções de regressão estatística mostradas na figura 1.

Análise	Pb (ppm)	$\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}$	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$
PL01	575,797	12,2987	13,5756
PL02	561,230	12,3371	13,6033
PL03	649,776	12,1194	13,4456
PL04	406,396	12,8306	13,9574
PL05	980,965	11,5277	13,0118
PL06	525,386	12,4364	13,6750
PL07	334,545	13,1376	14,1753
PL08	1442,519	11,0000	12,6184
PL09	599,774	12,2379	13,5315
PL10	926,299	11,6083	13,0713

A fórmula química média encontrada para os plagioclásios medidos é:



A massa molecular da fórmula química acima é aproximadamente 253,19 g/mol. Adotando a proporção molecular dos cátions de Pb em cada medida da tabela 3 obtêm-se as concentrações de Pb no plagioclásio em cada medida da microsonda. A fórmula para calcular a quantidade de chumbo em ppm é:

$$[\text{Pb}] = \left(\frac{\text{Prop.}(\text{Pb})M(\text{Pb})}{253,19} \right) \times 10^6 \quad (4)$$

Onde Prop.(Pb) é a proporção de cátions de Pb por molécula, M(Pb) é a massa atômica do chumbo com valor ~ 207,2 g/mol e a massa molecular da cela unitária do plagioclásio é 253,19 g/mol.

A partir desses resultados, aplicando nas funções de regressão obtidas os valores da concentração de Pb calculam-se as razões isotópicas $\text{Pb}^{206}/\text{Pb}^{204}$ e $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{204}$ para cada medida efetuada sendo os resultados listados na tabela 4.

A fórmula matemática para a datação pelo sistema isotópico Pb-Pb é:

$$\frac{\left[\left(\frac{Pb^{207}}{Pb^{204}}\right) - \left(\frac{Pb^{207}}{Pb^{204}}\right)_I\right]}{\left[\left(\frac{Pb^{206}}{Pb^{204}}\right) - \left(\frac{Pb^{206}}{Pb^{204}}\right)_I\right]} = \left(\frac{U^{235}}{U^{238}}\right) \left(\frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1}\right) \quad (5)$$

Na equação (5), as razões com sobrescritos “I” são as razões iniciais de chumbo radiogênico que indicam se havia certa quantidade de chumbo radiogênico no sistema antes de iniciar o decaimento do urânio para chumbo, a razão isotópica atual $\frac{U^{235}}{U^{238}}$ tem o valor aproximado de:

$$\frac{U^{235}}{U^{238}} = \frac{1}{137,88}$$

Nos exponenciais, os valores λ_{235} e λ_{238} são as constantes de decaimento radioativo dos isótopos U^{235} e U^{238} respectivamente e “t” é a idade da amostra.

Os valores das constantes de decaimento ($\lambda_{235} = 3,12 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$; $\lambda_{238} = 4,916 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$)

são inseridos na equação (5) para calcularmos o valor de “t” que representa a idade do metamorfismo do condrito.

A partir dos dados obtidos monta-se uma reta de regressão que dará a posição da reta de isócrona para o sistema Pb-Pb. A inclinação da reta fornece a idade do metamorfismo dos cristais de plagioclásio no condrito. A equação da isócrona gerada pela tabela 4 é:

$$\left(\frac{Pb^{207}}{Pb^{204}}\right) = 0,7259 \left(\frac{Pb^{206}}{Pb^{204}}\right) + 4,6028 \quad (6)$$

A reta isócrona na equação (6) e a idade aproximada do metamorfismo estão representadas na figura 2.

Considerando a baixa precisão da análise para um elemento traço e as considerações feitas sobre fracionamento do chumbo, o resultado apresentado na figura 2 pode ser considerado razoavelmente aceitável se observarmos os erros estatísticos aqui apresentados.

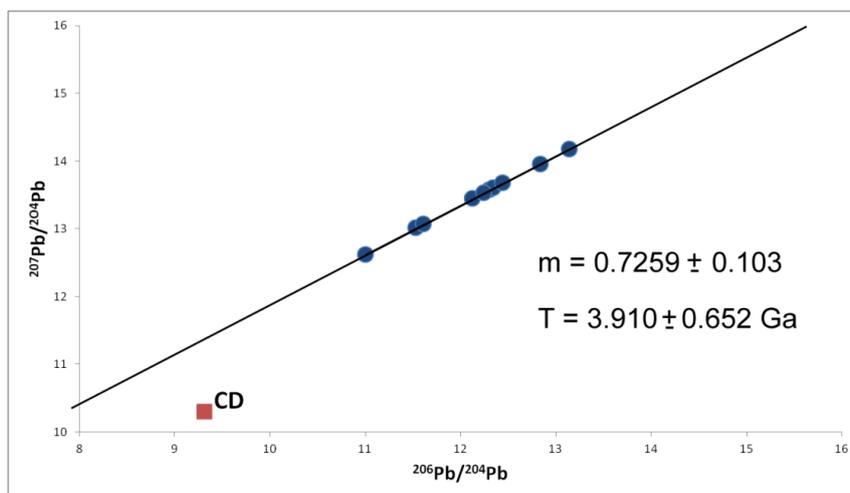


Figura 2 - Isócrona Pb-Pb com os pontos gerados pela Tabela 4 apresentando o valor aproximado da inclinação da reta com uma idade teórica de ~ 3.910 Ga o que pode ser considerado uma idade razoavelmente próxima do valor correto considerando o método aqui empregado de aproximação de fracionamento por um mineral metamórfico a partir de química mineral, uma técnica de baixa precisão para determinações isotópicas. CD é o valor para o Canyon Diablo como referência. Os erros foram calculados a partir dos valores esperados para a idade dos condritos carbonáceos fornecidos por Arden (1983) utilizando o condrito Allende.

O método de aproximação para encontrar a idade de um mineral metamórfico em um condrito comum a partir de dados de outro condrito primitivo carbonáceo considerando apenas a correlação dos dados fornecidos pela literatura científica com a química mineral fornecida por análises de microsonda demonstrou a possibilidade de usar materiais geológicos de origens semelhantes para obter uma datação aproximada de uma rocha cuja única informação obtida seja de natureza

química.

A idade encontrada aqui possui uma margem de erro de 652 Ma, porque as razões isotópicas não foram encontradas diretamente, mas foram inferidas pela química mineral do plagioclásio e de considerações sobre o fracionamento do condrito Allende ter relação com a química da matriz recristalizada do Campos Sales representada pelos grãos de plagioclásio analisados. A precisão também está próxima do limite de detecção do elemento traço Pb no

plagioclásio pela microsonda eletrônica o que limita o grau de certeza das concentrações de Pb obtidas em ppm. Outras considerações devem ser feitas para utilizar esse método em outros sistemas isotópicos. Por exemplo, dados de K-Ar, Rb-Sr e Th-Pb podem ser correlacionados com grande cautela de forma parecida à abordagem aqui feita para os isótopos de Pb devido às diferenças de comportamento geoquímico existentes entre esses elementos.

O critério mínimo é a discrepância de afinidade geoquímica e cosmoquímica, em termos de temperaturas de condensação na época da acreção dos planetesimais e difusão iônica durante metamorfismo termal entre os elementos considerados. A vantagem do Pb é que se pode utilizar da datação pelo sistema Pb-Pb sem a necessidade de ter análises para o urânio. Outros sistemas isotópicos como Sm-Nd, Lu-Hf e Re-Os apresentarão dificuldades neste tipo de abordagem devido às semelhanças de temperatura de condensação cosmoquímica e afinidades geoquímicas desses elementos sendo muito pouco fracionados em termos de difusão durante metamorfismo termal.

Esse método pode ser aplicado às rochas terrestres se houver uma relação de cogeneticidade entre elas ou se representam o mesmo tipo de reservatório geoquímico, como por exemplo, um xisto pelítico e seu protólito, o folhelho, onde o protólito com dados de concentração de Pb e suas razões isotópicas pode fornecer a idade aproximada do xisto, embora essa demonstração de datação química esteja apresentada aqui para materiais de idades próximas à idade do Sistema Solar que podem ser usados como elementos de comparação com fracionamentos geoquímicos consideráveis e próximos entre si devido à ausência de múltiplas histórias de extração geoquímica tais como metamorfismo de alta pressão e fusão parcial seguida de magmatismo.

Outra consideração implícita e que se aplica ao sistema isotópico Pb-Pb é a evolução isotópica do chumbo ao longo da história do Sistema Solar o que fornece a reta de idade do mesmo e aproximadamente da Terra. Razões isotópicas de

meteoritos foram comparadas entre si para fornecer a reta de regressão e todas elas foram utilizadas como parâmetro de comparação para gerar a idade aproximada da Terra e do Sistema Solar visto que datar meteoritos de diferentes naturezas significa calcular a idade de diversos materiais planetários, a maioria deles oriundos de asteroides (Tatsumoto et al., 1973).

Rochas terrestres apresentam mais de uma história de extração geoquímica e as modificações não podem ser facilmente identificadas e traçadas a um protólito em comum a não ser em relação ao comportamento dos elementos terras-raras da rocha em relação ao reservatório condritico uniforme (CHUR), (Evensen et al., 1978; Anders & Ebihara, 1982). Idades modelo T_{CHUR} utilizando os sistemas isotópicos Sm-Nd e Re-Os fornecem idades reais de extração magmática apenas para rochas primárias de origem no manto empobrecido (Depaolo & Wasserburg, 1976; Bennett et al., 2002).

Quando aplicado a metassedimentos e rochas graníticas, as datações T_{CHUR} fornecem idades máximas de fontes anteriores normalmente sedimentares que remontam a rochas primárias (Kirk et al., 2002). Estabelecer um reservatório geoquímico adequado e o mineral índice para se datar um evento, seja de cristalização ou metamorfismo, é o ponto chave nessa abordagem de datação química aproximada. Vários aspectos dessa datação precisam ser investigados e modelos de fracionamento geoquímico mais eficientes e complexos precisam ser desenvolvidos para se melhorar a precisão do método, onde tais modelos dependem de dados ainda escassos sobre a difusão de Pb no plagioclásio durante metamorfismo termal de baixa pressão (Cherniak, 1995). Esse método fornece uma maneira de analisar o comportamento dos isótopos radiogênicos e sua relação com a concentração dos elementos traços em reservatórios geoquímicos que servem de parâmetro de normalização em muitos outros trabalhos de geoquímica e geocronologia como os condritos e as rochas representativas do manto empobrecido (Frey, 1983).

CONCLUSÃO

As medidas de química mineral dos plagioclásios de um condrito comum metamorfizado (Campos Sales) apresentaram valores do elemento traço Pb que foram úteis na

determinação da concentração desse elemento em cada análise em ppm. A concentração de Pb no plagioclásio metamórfico forneceu resultados coerentes das razões isotópicas Pb^{206}/Pb^{204} e

Pb²⁰⁷/Pb²⁰⁴ através das funções de regressão geradas pelas considerações feitas com respeito ao fracionamento geoquímico do Pb a partir do reservatório geoquímico representado aqui pelo condrito carbonáceo Allende.

A baixa precisão do método pode ser demonstrada através das concentrações de Pb obtidas pela química mineral das análises de microsonda eletrônica que dependeram das medidas próximas do limite de detecção para o componente PbO no plagioclásio sódico. Além disso, a função de regressão foi gerada a partir da conjectura de que há uma relação de fracionamento entre o condrito Allende e Campos Sales e este pôde ser quantificado através das análises químicas de ambos e tirando-se uma média dentre suas razões. Essa consideração está embasada na semelhança entre a matriz do condrito Allende e a mesostasis recristalizada representada pelo plagioclásio sódico.

A discrepância do comportamento

geoquímico e cosmoquímico do Pb apresentou-se e pôde ser aproveitada devido a sua alta mobilidade na forma iônica durante eventos térmicos e sua baixa temperatura de condensação o que produz extenso grau de fracionamento cosmoquímico de um reservatório condritico para outro.

O resultado dessa correlação entre dois condritos distintos foi a reta isócrona do sistema isotópico Pb²⁰⁶-Pb²⁰⁷ que revelou uma idade para o metamorfismo do Campos Sales de 3,910 Ga com um erro calculado de 652 Ma. Essa grande margem de erro é o reflexo da baixa precisão desse método que visa ser mais comparativo do que quantitativo devido a depender de muitas considerações e conjecturas. No entanto tal método aqui apresentado não deixa de representar uma maneira de se extrair informações isotópicas a partir de química mineral quando se possui elementos de comparação confiáveis por serem de mesma natureza geoquímica.

REFERÊNCIAS

- ANDERS, E. & EBIHARA, M. Solar-System abundances of the elements. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 46, n. 11, pp. 2363–2380, 1982.
- ARDEN, J. W. Distribution of lead and thallium in the matrix of the Allende meteorite and the extent of terrestrial lead contamination in chondrites. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 62, p. 395 – 406, 1983.
- BENNETT, V.C.; NUTMAN, A. P.; ESAT, T.M. Constraints on mantle evolution from ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os isotopic compositions of Archean ultramafic rocks from southern West Greenland (3.8 Ga) and Western Australia (3.46 Ga). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 66, n. 14, p. 2615–2630, 2002.
- CHERNIAK, D.J. Diffusion of lead in plagioclase and K-feldspar: an investigation using Rutherford Backscattering and Resonant Nuclear Reaction Analysis. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 120, n. 3, p. 358 – 371, 1995.
- DEPAOLO, D.J. & WASSERBURG, G.J. Nd isotopic variations and petrogenesis models. **Geophysical Research Letters**, v. 3, n. 5, p. 249, 1976.
- EVENSEN, N.M.; HAMILTON, P.J.; O'NIONS, R.K. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 42, n. 8, p. 1199–1212, 1978.
- FREY, F.A. Rare earth element abundances in upper mantle rocks. **Developments in Geochemistry**, v. 2, p. 153 – 203, 1983.
- KESSEL, R.; BECKTEE, J.R.; STOLPER, E.M. The thermal history of equilibrated ordinary chondrites and the relationship between textural maturity and temperature. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 71, p. 1855–1881, 2007.
- KIRK, J.; RUIZ, J.; CHESLEY, J.; WALSH, J.; ENGLAND, G. A major Archean gold- and crust-forming event in the Kaapvaal Craton, South Africa. **Science**, v. 297, p. 1856 – 1858, 2002.
- Lodders, K. Solar System abundances and condensation temperatures of the elements. **The Astrophysical Journal**, v. 591, p. 1220 – 1247, 2003.
- MARSHALL, R.R. Mass spectrometric study of the lead in carbonaceous chondrites. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, n. 5, p. 2005 – 2015, 1962.
- MCSWEEN, JR., H.Y. & RICHARDSON, S.M. The composition of carbonaceous chondrite matrix. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 41, p. 1145 – 1161, 1977.
- MONTEL, J.M.; FORET, S.; VESCHAMBRE, M.; NICOLLET, C.; PROVOST, A. Electron microprobe dating of monazite. **Chemical Geology**, v. 131, p. 37 – 53, 1996.
- PATTERSON, C. Age of meteorites and the earth. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 10, p. 230 – 237, 1956.
- PATTERSON, C. & BROWN, H. Concentration of uranium and lead and the isotopic composition of lead in meteoritic material. **Physical Review Letters**, v. 92, n.5, p. 1234 – 1235, 1953.
- SCORZELLI, R.B., MICHEL-LEVY, M.C., GILABERT, E., LAVIELLE, B., AZEVEDO, I. SOUZA VIEIRA, V.W.; COSTA, T.V.V.; ARAUJO, M.A.B. The Campos Sales meteorite from Brazil: A lightly shocked L5 chondrite fall; **Meteoritics & Planetary Science**, v. 33, p. 1335-1337, 1998.
- TATSUMOTO, M.; KNIGHT, R.J.; ALLEGRE, C.J. Time differences in the formation of meteorites as determined from the ratio of lead-207 to lead-206. **Science**, v. 180, p. 1279-1283, 1973.

Submetido em 19 de maio de 2018
Aceito em 18 de setembro de 2019