HISTÓRIA TÉRMICA DO MACIÇO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS (SP/MG) E ADJACÊNCIAS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE DATAÇÃO POR TRAÇOS DE FISSÃO EM APATITAS

ANA OLÍVIA BARUFI FRANCO¹, PETER CHRISTIAN HACKSPACHER²,
DANIEL FRANÇOZO DE GOGOY¹, LUIS FELIPE BRANDINI RIBEIRO² &
SANDRO GUEDES³

Resumo A Plataforma Sulamericana, na região Sudeste brasileira, foi palco de diversas manifestações tectono-magmáticas e de soerguimento como consequência da abertura do Oceano Atlântico-Sul, reativação cretácica e epirogênese posterior. Exemplos disso são o magmatismo básico da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, magmatismo alcalino do Alinhamento Poços de Caldas-Cabo Frio, além do soerguimento da Serra da Mantiqueira e Serra do Mar, entre outros.

Dados geocronológicos através dos métodos K-Ar em rochas do Maciço Alcalino de Poços de Caldas evidenciam uma evolução que se inicia com a intrusão em cerca de 89 Ma. Resultados obtidos pelo método de datação por traços de fissão em apatitas apresentaram idades corrigidas próximas a 60 Ma, indicativas de episódio de resfriamento rápido relacionado aos processos tectônicos referentes à estruturação do maciço. Enquanto isso, as serras que o bordejam registram eventos de aquecimento em resposta à atividade ígnea e processos subsequentes, entre 70 e 50 Ma. Períodos de soerguimento lento, provavelmente relacionados aos Ciclos Erosivos Sul-Americano (entre 50 e 30 Ma) e Velhas (a partir de 25 Ma), indicam uma forte atuação do componente denudação na área.

Palavras-chave: Palavras-Chave: História Térmica, Traços de Fissão, Maciço Alcalino de Poços de Caldas, Aquecimento, Domeamento

Abstract *THERMAL HISTORY FROM POÇOS DE CALDAS ALKALINE MASSIF (SP/MG) AND DYKE RICH MARGINS USING APATITE FISSION TRACK ANALYSIS* The South American Platform in southeastern Brazil records a long history of tectonic-magmatic and uplift events, which resulted from the opening of the South Atlantic Ocean, Cretaceous reactivation and epirogenic processes. Specific manifestations include the basic magmatism of the Serra Geral Formation of the Parana Basin and alkaline magmatism of Poços de Caldas – Cabo Frio Lineament, as well as the uplift of the Serra da Mantiqueira and Serra do Mar mountain ranges.

Thermotectonic and geochronological studies using the K-Ar method and apatite fission track analysis in samples of the Poços de Caldas alkaline massif show an initial evolution beginning 89 Ma related to a tectonic uplift, interpreted as related to the intrusion's doming. This was followed by an important episode of rapid cooling related to the formation of the massif. At the same time, the mountains that surround the massif record heating events in response to the alkaline intrusion, between 70 and 50 Ma. Periods of slow uplift, probably related to the South American Erosion Cycle (between 50 and 30 Ma) and Velhas Erosion Cycle (from 25 Ma), indicate a strong manifestation of denudation in this area.

Key-words: Thermal History, Fission Tracks, Poços de Caldas Alkaline Massif, Heating, Doming

INTRODUÇÃO O estudo de eventos térmicos ocorridos durante o Fanerozóico, particularmente em zonas aquecidas da Plataforma Sul-Americana, é de fundamental importância para o entendimento e reconstrução do relevo a partir do Cretáceo.

Devido às características de anomalia térmica associadas ao Maciço alcalino de Poços de Caldas (MAPC) pretendeu-se reconstruir a evolução térmica das rochas associando-a a evolução da paisagem, já que sua evolução encontra-se associada às deformações na litosfera durante o processo de abertura do Oceano Atlântico-Sul.

A evolução do MAPC e adjacências inicia-se com a intrusão de rochas félsicas em aproximadamente 89 Ma, estendendo-se até cerca de 54 Ma (Sonoki & Gardá 1988, Ulbrich *et al.* 2002). A intrusão localiza-se na borda NW da Bacia do Paraná, em terrenos pré-cambrianos denominados de Terreno Socorro-Guaxupé (Campos Neto 2000, Cordani *et al.* 2000) (Fig. 1). Alguns autores admitem

que sua evolução se deu a partir de um domeamento com posterior colapso e formação de estrutura em caldeira, seguidos por intrusões de tinguaítos, nefelina sienitos e fonólitos ao longo de fendas (Ellert, 1959, Amaral *et al.*, 1967, Bushee, 1974, Ulbrich & Ulbrich, 1992). O maciço alcalino possui ainda estruturas circulares associadas à presença de cones vulcânicos no interior do maciço, bem como um extenso número de fotolineamentos, que eventualmente cortam o maciço e prolongam-se para as encaixantes, cujas direções predominantes são ENE, NE e NW, e outras poucas de direção NS (Almeida Filho & Paradella, 1977).

CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO REGIONAL

O MAPC está localizada a NE do estado de São Paulo e SW do estado de Minas Gerais (Fig. 1) inserindo-se no Setor Central da Província Mantiqueira, a sul do Cráton São Francisco e da Faixa Brasília (Cordani *et al.* 2000) cuja evolução geológica tem sido

1 - Pós-Graduação em Geociências – Depto. de Petrologia e Metalogenia, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro/SP, Av. 24-A, 1515, Rio Claro – SP, C.P.: 178, CEP:13.506-900. E-mail: aobf@rc.unesp.br

2 - Depto. de Petrologia e Metalogenia, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro/SP, Av. 24-A, 1515, Rio Claro – SP.

3 - Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Universidade de Campinas, Campinas / SP. C.P.:6152, CEP: 13.081-970.

Figura 1- Mapa geológico-regional da área de estudo com a localização dos pontos amostrados para ATFA. Base geológica modificada de Veríssimo (1991) e Campos Neto (2000). Legenda A - Complexo Varginha-Guaxupé, B - Complexo Amparo, C - Associações Graníticas Granodioríticas Paleoproterozóicas, D - Intrusões Graníticas calci-alcalina-potássicas e Suites Charnokíticas Brasileiras, E - Suite Mangerítica Granítica Brasileira, F - Intrusões Sieníticas Brasileiras, G - Grupo Itararé da Bacia do Paraná, H - Formação Serra Geral da Bacia do Paraná, I - Fonólitos, J - Nefelina Sienitos, K - Lujauritos e Chibinitos, L - Lava Piroclástica, M - Aglomerados Vulcânicos, N - Sedimentos Clásticos, O - Quaternário Indiferenciado.

explicada através de uma história policíclica que se iniciou no Arqueano e finalizou com a Orogênese Brasileira durante a aglutinação do Gondwana Ocidental no Neo-Proterozóico (Cordani et al. 2000, Hackspacher et al. 2003).

A Província Mantiqueira, assim denominada inicialmente por Almeida et al. (1981), apresenta uma evolução Brasileira – Pan-Africana, que envolve as Faixas Ribeira, Araçuaí e Dom Feliciano, além de incluir diversos fragmentos crustais de diferentes idades e evoluções tectônicas (Cordani et al. 2000).

A Faixa Brasília, segundo Hackspacher et al. (2003), segue o entorno oeste do Cráton São Francisco e apresenta uma história evolutiva neo-proterozóica, inicialmente independente da Faixa Ribeira, seguida de processo colisional comum a ambas as faixas.

A porção central da Província Mantiqueira está inserida em um sistema de *nappes* frontais denominado de Nappe Socorro – Guaxupé por Campos Neto (2000), composto pelos Complexos Varginha-Guaxupé e Amparo. Inclui rochas do embasamento cons-

tituídas principalmente por orto e paragneisses paleoproterozóicos com menores ocorrências de rochas arqueanas (Artur, 1988, Fetter et al. 2001, 2003). São seguidas assembléias de arco magmático, unidades vulcano-sedimentares e supracrustais mesoproterozóicas a neoproterozóicas representando a cobertura do embasamento, intrudido por abundantes intrusões e associações graníticas, por vezes, charnockíticas, pré, sin e pós-colisionais durante a colagem orogênica brasileira (Cordani et al. 2000, Hackspacher et al. 2003).

Ebert et al. (1996), Janasi et al. (2001) e Fetter et al. (2001) indicam que a principal fase de colisão entre os Crátons São Francisco, Congo e Paraná ocorreu entre 625 e 610 Ma, período de expressão regional envolvendo tanto a Faixa Ribeira como a Faixa Brasília. Ao redor de 610 Ma teria ocorrido um processo de escape lateral, tardi-colisional associado ao magmatismo alcalino ao redor de 600 Ma (Hackspacher & Godoy, 1999), representado na região pelo Maciço Sienítico da Pedra Branca, constituído por intrusões

sieníticas originadas pela reativação e segregação do manto listoférico (Campos Neto 2000).

A deposição de sedimentos durante o Fanerozóico encontra-se representada na área pela Bacia do Paraná, importante sequência sedimentar aflorante na porção centro-sul do Brasil. Estende-se desde o Paleozóico até o Cretáceo, afetados pelos processos de abertura continental, culminando com manifestações magmáticas de caráter ultrabásico, básico e alcalino (Almeida & Carneiro, 1998).

O MAPC é constituído principalmente por fonólitos intrusivos (78%) e nefelina sienitos (14%), seguidos de lavas fonolíticas (5%) e rochas piroclásticas (3%, que incluem tufos, aglomerados e brechas), conforme descritos por Ellert (1959) e Ulbrich & Ulbrich (1992). Segundo Ulbrich & Ulbrich (2000), tinguaitos são as primeiras rochas intrusivas, seguidas pela intrusão de nefelina sienitos, seguidos pelos chibinitos e lujaunitos.

Segundo IPT (1981) a área possui uma das feições mais marcantes do relevo, pois são encontrados níveis planálticos intercalados por serranias. Almeida & Carneiro (1998) identificaram planaltos e escarpas localizados em regiões topograficamente altas, demonstrando evidências de uma erosão intensa, de forma que as principais superfícies de erosão pós-Paleozóicas da região SE do Planalto Atlântico sejam observadas na área. Exemplos disso são a Superfície Sul – Americana ou Japi assim inicialmente denominado por Almeida (1958, 1964), apresenta grande extensão no SE do Brasil e nivela superfícies cumiadas e serras ou, localmente, restos de planaltos elevados, atingindo altitudes de 1200 a 1300 m, como é o caso das intrusões alcalinas cretácicas da Serra da Mantiqueira, do oeste do estado de Minas Gerais e sudeste do estado de Goiás.

MÉTODOS A ATFA consiste na análise de traços de fissão registrados na apatita, o que reflete a história evolutiva da rocha envolvida em processos geológicos, basicamente, fanerozóicos.

O método baseia-se no fato de que minerais como a apatita, contêm pequenas quantidades (ppm) de urânio como impureza. Dessa forma, o ^{238}U , o isótopo mais abundante do urânio, decai por fissão espontânea em outros dois núcleos com massa atômica média entre 95 e 135 (Fleisher et al., 1975), que viajam em direções opostas com altas energias (~100 MeV). No percurso, estes fragmentos de fissão interagem com os átomos da rede cristalina, dando origem a uma região ionizada. O alcance combinado destes fragmentos é o chamado traço latente. Os traços latentes são produzidos continuamente no mineral ao longo de sua história geológica, seguindo a lei de decaimento radioativo com uma constante de decaimento por fissão espontânea λ_f . A equação de idades deste método é:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[g \frac{\rho_s}{\rho_i} \frac{\lambda R_U}{\theta_{238} \lambda_f} + 1 \right] \quad (1)$$

onde ρ_s e ρ_i são as densidades superficiais de traços de fissão espontânea e induzida, respectivamente; g é um fator de geometria; λ_f é a constante de desintegração por fissão espontânea do ^{238}U ; θ_{238} é a concentração isotópica do ^{238}U no urânio natural e $R_U = \sum R_i$ (R_i é a fração de eventos de fissão por núcleo alvo de ^iU). R é dado por:

$$R = \sum_i \theta_i \int_0^\infty \sigma_i(E) \phi(E) dE \quad (2)$$

Nesta equação, θ_i é a concentração isotópica do ^iU no urânio natural; $\sigma_i(E)$ é a seção de choque da reação $^i\text{U}(n,f)$, pela energia do nêutron, E ; $\phi(E)$ é a fluência de nêutrons com energia E por

unidade de energia.

Na equação (1), os parâmetros λ_f e R_U são fundamentais para a determinação da idade. Neste trabalho, a determinação de R_U segue o método descrito em Bigazzi et al. (1995a, 1995b, 1995c, 1999), Iunes (1999) e Iunes et al. (2002). O valor de λ_f utilizado é $\lambda_f = (8,37 \pm 0,17) \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$ (Guedes et al. 2003a). Este valor foi determinado experimentalmente utilizando a técnica de dosimetria descrita em Iunes et al. (2002) e está de acordo com a recomendação da IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) (Holden & Hoffman 2000) e com outras medidas recentes (Guedes et al. 2000, 2003b). Se a quantidade de fissões induzidas no ^{235}U por nêutrons térmicos for muito maior que a fissão induzida por nêutrons rápidos no ^{238}U , a equação (2) pode ser aproximada por $R_U \approx \theta_{235} \sigma_{235} \phi$, onde ϕ é a fluência de nêutrons térmicos.

Sabe-se que os traços de fissão são encurtados pela ação combinada de tempo e temperatura (Fleischer et al. 1975), que causa uma diminuição no nível de ionização do traço latente. A este fenômeno dá-se o nome de *annealing*. No caso da apatita, os traços são completamente apagados quando submetidos a temperaturas de ordem de 120 °C por períodos de tempo geológicos (ver, por exemplo, Wagner & Van Den Haute 1992). A primeira consequência é que a redução no comprimento dos traços causa uma diminuição da densidade de traços e, conseqüentemente, da idade do mineral (Green 1988, Guedes et al. 2004). Assim a idade dada pela equação (1) é a idade aparente no mineral. Esta idade pode ser corrigida através da curva de correção que representa a relação entre o encurtamento dos traços e a diminuição na densidade dos traços. Neste trabalho, usou-se a equação apresentada em Guedes et al. (2004) ajustada para os dados experimentais de Tello (1998).

Se por um lado, o efeito de *annealing* é prejudicial por afetar as idades, por outro ele permite a reconstrução da história térmica de uma amostra a partir da idade em que ela cruzou pela última vez a isoterma de 120°C, num *range* denominado de Zona de *Annealing* Parcial, que se estende de 120°C até 60°C. Para isto é necessário que se conheça a cinética de *annealing*. Normalmente, utilizam-se equações empíricas ajustadas a dados de laboratório (por exemplo, Ketcham et al. 1999).

As aplicações da ATFA na Geologia se baseiam na possibilidade de se reconstruir histórias térmicas da crosta terrestre a partir da época em que as rochas estiveram a aproximadamente 4 km de profundidade (profundidade aproximada da isoterma de 120°C (para grau geotérmico de 30°/km). Associado a outros métodos de datação, como por exemplo, K/Ar, Ar/Ar e Rb/Sr, a ATFA permite a análise da história térmica da crosta em uma dada região, como descrito em trabalhos realizados por Poupeau & Soliani Jr. (1988), Roger et al. (2003) e Hackspacher et al. (2004).

Na análise dos traços de fissão foi utilizado o Método do Detector Externo ou EDM (*External Detector Method*) (Wagner & Van Den Haute 1992). Nesse método, somente uma única alíquota de apatita é necessária. Os grãos são montados em resina epóxi, polidos e atacados quimicamente para revelar os traços fósseis. Um detector externo, usualmente uma placa de muscovita, é acoplado à montagem com os grãos e o conjunto é irradiado com nêutrons térmicos. Durante a irradiação, a mica registra os traços de fissão induzida gerados nos grãos de apatita (geometria 2p, ou seja, fonte externa em contato com a superfície do detector). Em seguida, a mica é atacada quimicamente. As densidades superficiais traços de fissão espontânea e induzida são medidas no grão e na posição correspondente na mica. Assim, no EDM é possível obter idades individuais para cada grão, o que torna este método

bastante oportuno para amostras com poucos grãos, em sedimentos ou em amostras com alta heterogeneidade de urânio (Wagner & Van Den Haute 1992). Note que no EDM o fator g é idealmente igual a 0,5 (2p/4p), mas na prática, devido à diferença de eficiência entre a mica e a apatita, este fator varia entre 0,5 e 0,6 (Iwano & Danhara 1998, Jonckheere 2003).

Para que se obtenha a história térmica do mineral é preciso medir a distribuição de comprimentos de traços, que é o resultado total do *annealing* experimentado pela amostra. A melhor aproximação para o comprimento dos traços é o comprimento dos traços confinados (inteiramente contidos no volume do cristal) paralelos à superfície de observação. Estes traços são atacados quimicamente por meio de fraturas ou outros traços superficiais.

A modelagem das histórias térmicas foi realizada utilizando-se o programa *Tha*® (*Thermal History Analysis*) (Hadler Neto *et al.* 2000). O modelo utilizado neste programa é chamado "fanning Arrhenius" (Laslett *et al.* 1987) ajustado para os dados de redução de traços de Tello (1998). A busca de histórias térmicas é feita através de simulações de Monte Carlo. Caixas são delimitadas no espaço tempo (t)-temperatura (T) acordo com as características geológicas e geomorfológicas da área. As condições da amostra no presente ($t=0$ Ma e $T=25^\circ\text{C}$), são usadas como um parâmetro adicional. Histórias térmicas (curvas no espaço t-T) são sorteadas e com o auxílio do modelo de *annealing*, um histograma de comprimentos teórico é construído e uma idade aparente teórica é calculada. Se o histograma teórico for estatisticamente compatível com o histograma experimental e a idade teórica estiver dentro de dois desvios da idade medida experimentalmente, a história térmica é aceita. Não é raro mais de um tipo de história térmica passar nos testes estatísticos. Quando isto acontece, todas as possibilidades devem ser consideradas para análise.

RESULTADOS As amostras coletadas para ATFA com a finalidade de reconstruir a história termocronológica e idade do MAPC e áreas adjacentes encontram-se ilustrados na figura 1 e listadas na Tabela 1. De posse dos dados de contagem e medição dos traços de fissão em apatitas foram feitas as seguintes considerações:

As histórias térmicas obtidas das amostras em questão iniciam seu registro em torno de 60°C , ou seja, muito abaixo da temperatura da zona de annealing do traço de fissão em apatitas (120°C), em cerca de 70 Ma. Isso significa que deve ter havido um soerguimento tectônico muito evidente (a amostra passou muito rapidamente pela isoterma de 120°C), a ponto de não ser registrado na mesma. Tal soerguimento é interpretado como um possível domeamento da região em momento antecedente à intrusão alcalina.

Na figura 2(a) encontram-se plotadas as idades de traços de fissão em apatitas *versus* a altitude atual correspondente a cada amostra. Dessa forma, pode-se concluir que há um *trend* de crescimento da idade de traço de fissão com o aumento da altitude.

Já na figura 2(b) foram plotadas a média do comprimento dos traços confinados *versus* a idade de traço de fissão em apatitas. As médias referentes às amostras coletadas no dique anelar possuem valores maiores quando comparadas às outras amostras, significativo de um resfriamento mais rápido quando comparadas às amostras localizadas nas adjacências do Maciço.

Tal fato é confirmado por suas histórias térmicas (amostras TF-311 e TF-502, Figs. 3a e b, respectivamente) e pelo gráfico tempo x temperatura, em torno de 60 Ma (Fig. 4), que evidenciam tal evento.

Com efeito, a explicação condizente das outras amostras (TF-506, TF-507 e TF-509) apresentarem média de comprimento de traço confinado menor pode ser o reflexo de uma permanência maior na zona de *annealing* parcial (120 a 60°C), registrando o efeito térmico da extrusão em rochas circunvizinhas. Tal ocorrência também foi observada por Gallagher *et al.* (1995) em rochas sedimentares da Bacia do Paraná próximas às vulcânicas pertencentes à Formação Serra Geral, entre Florianópolis e Porto Alegre.

As idades corrigidas obtidas em amostras localizadas nas seras que bordejam o MAPC (Figs. 3c, d, e) são pertencentes ao limite Cretáceo Superior (Tabela 1) (Campaniano e Maastrichtiano) e registram idade da intrusão, em cerca de 74 Ma, sendo muito condizente com a idade K-Ar em torno de 70 Ma, obtida por Amaral *et al.* (1967), Bushee (1974), Ulbrich (1983), Sonoki & Garda (1988), Ulbrich *et al.* (2002), Vlach *et al.* (2003) (Figs. 3a, b; 4).

Tabela 1 – Localização e resultados obtidos na ATFA para as amostras coletadas. r_s / r_l – densidade média dos traços de fissão na apatita e na mica. L_m – tamanho médio dos traços de fissão em apatitas. $\dot{\Phi}$ – Fluência de nêutrons durante irradiação no Reator Nuclear no Instituto de Pesquisas Nucleares (IPEN)/ USP.

Posição em relação ao MAPC	Nº da Amostra	Altitude (m)	Coordenadas Geográficas	Litologia	Unidade Estrutural	Nº de grãos	ρ_s / ρ_l	$L_m (\mu\text{m})$ / total de traços confinados	Φ ($\times 10^{15}$ nêutrons/ cm^2)	Idade Aparente (Ma)	Idade Corrigida (Ma)
Adjacências do MAPC	TF-506	1470	21°56'S, 46°24'W	Sienito fácies marron – café	MSPB	88	1,12	11,60/15	$1,81 \pm 0,01$	$55,5 \pm 5$	74 ± 7
	TF-507	1290	21°55'S, 46°23'W	Sienito fácies marron – café	MSPB	98	1,14	11,86/22	$1,81 \pm 0,01$	$56,5 \pm 5$	74 ± 8
	TF-509	1073	21°52'S, 46°21'W	Granito	Intrusão Granítica Brasileira	81	1,03	12,17/36	$1,81 \pm 0,01$	$51,6 \pm 6$	65 ± 6
MAPC	TF – 502	1180	21°46'S, 46°37'W	Rocha piroclástica com cristais de flogopita	MAPC	79	1,36	12,53/ 15	$1,69 \pm 0,02$	51 ± 5	63 ± 9
	TF – 311	1537	21°46'S, 46°34'W	Fonólito	MAPC	27	1,32	12,35/ 19	$1,69 \pm 0,02$	60 ± 6	76 ± 10

Figura 2 - (a) - Idade de traços de fissão em apatita x Altitude. (b) - Idade de traço de fissão em apatita x média do comprimento dos traços confinados. Ver texto para discussão.

Através de idades K-Ar em feldspato potássico, piroxênio, anfibólio e em rocha total obtidas Bushee (1974) e corrigidas para novas constantes por Sonoki & Garda (1988); juntamente com estudos sobre geotermometria em rochas do MAPC realizados por Ulbrich (1993), aliados a idades de traços de fissão em apatitas foi possível elaborar uma curva de resfriamento (gráfico tempo-temperatura - Figura 4) no qual podem ser analisados períodos de cristalização do magma alcalino, bem como episódios tectonotermiais associados às atividades intrusiva e de estruturação da caldeira vulcânica, devido à diferença existente entre os termocronômetros utilizados, onde cada qual possui diferentes temperaturas de fechamento sendo que tal valor, na metodologia K-Ar, ocupa um *range* entre 900 e 500°C, e na análise por traços de fissão em apatitas, uma zona entre 120 e 60°C.

O referido diagrama tempo-temperatura (Fig. 4) reflete a evolução do MAPC partindo de uma etapa de domeamento, causado por uma intumescência térmica, seguida pelas primeiras intrusões, iniciadas em cerca de 89.3 Ma, com a intrusão de rochas básicas/ultrabásicas (ankaratritos). A partir de então, seguem períodos de relativa estabilidade (tectono) termal, provavelmente relacionado à "invasão" do magma alcalino tanto nas áreas periféricas (diques) quanto nas interioranas (planalto), pertencentes ao maciço, até cerca de 65 Ma.

Durante o período de aproximadamente 65 e 60 Ma é notado um resfriamento rápido de mais de 700°C (Fig. 4), possivelmente associado ao domeamento inicial e conseqüente atividade vulcânica precursora (Ulbrich & Ulbrich 1992). Tal evento pode estar relacionado a episódios tectônicos responsáveis pelo colapso da caldeira e estruturação do conduto vulcânico, a exemplo do Kenya Rift Valley (em intrusões na África), Long Valley (na Califórnia), Yellowstone - Snake River Plain (em Wyoming), além de áreas

Figura 3 - Histórias Térmicas (gráfico tempo x temperatura) modeladas com base na análise de traços de fissão em apatitas. A região acinzentada representa a idade de 60 Ma, interpretada como o período de estruturação e colapso da caldeira vulcânica.

também na Groenlândia, conforme descrito por Bosworth *et al* (2003).

A partir de 60 Ma até os dias atuais percebe-se uma tendência ao resfriamento lento e gradual (Figura 4), indicativo de intensos ciclos de soerguimento / erosão, possivelmente associados aos processos de peneplanização que originou a Superfície Sul – Americana (ou Japi) (entre 50 e 25 Ma), em superfícies cumiadas, na Serra da Mantiqueira e em intrusões alcalinas dos estados de Goiás e Minas Gerais (Almeida & Carneiro 1998). Localmente, a Superfície Sul – Americana nivela tanto o MAPC como o Maciço Sienítico da Pedra Branca (MSPB), conforme observações no Pico do Gavião, em Andradás (MG).

As histórias térmicas obtidas por análise de traços de fissão em apatitas indicam um aquecimento de 60 a 100°C registrado por essas amostras desde o Cretáceo Superior até o Terciário Inferior, entre 70 a 50 Ma, está associado ao soerguimento com consequente alçamento de isothermas no MSPB e no MAPC, como resultado da intrusão do dique anelar. Esse aquecimento também pode estar relacionado ao hidrotermalismo incidente no Maciço, através da percolação de fluídos no Cretáceo Superior e consequente alteração de rochas (dando origem às então chamadas rochas potássicas) e gênese da bauxita de origem hidrotermal (Valeton *et al* 1997) e mineralização de urânio (Garda 1990, Valeton *et al* 1997).

Alternativamente, tal evento também pode estar relacionado aos processos de soerguimento/ erosão da Serra do Mar (Tello *et al* 2003, Hackspacher *et al* 2004), devido ao soerguimento da Plataforma Sul-Americana (Almeida & Carneiro 1998) e movimentação da pluma mantélica de Trindade–Martin–Vaz (Lustrino *et al* 2003), através de alçamento de isógrads e domeamento associado.

O evento seguinte é um resfriamento constante associado ao Ciclo Erosivo Sul-Americano, que desde o Cretáceo Superior até o Oligoceno (registrado nas histórias térmicas das amostras TF-506 e TF-507, entre 50 e 30 Ma) nivela as intrusões alcalinas de Goiás (Catalão), Minas Gerais (Poços de Caldas, Araxá e Tapira) e Rio de Janeiro (Itatiaia e Passa Quatro) (Almeida & Carneiro 1998). Também é registrado um leve aquecimento até 60°C (TF-509) associado a um soerguimento devido à ascensão de isothermas no período Eoceno-Oligoceno, devido ao alçamento da Plataforma Sul-Americana e da Serra do Mar (Hackspacher *et al* 2004).

Por fim, segue um equilíbrio entre soerguimento x erosão, registrado tanto nas histórias térmicas das amostras da Serra da Mantiqueira como do MAPC e MSPB, caracterizado como um resfriamento lento, iniciado em cerca de 30 Ma, associado ao Ciclo Erosivo Velhas (King 1956). Tal ciclo é responsável pelos depósitos de encosta e aluviais encontrados na Serra da Mantiqueira (Ex. Bacia de Cambuí e outros) e pela formação da bauxita supergênica no interior do MAPC (Schullman *et al* 1997, Valeton *et al* 1997).

CONCLUSÕES Para todas as amostras analisadas, tanto as localizadas no interior do MAPC como no MSPB, foram obtidas idades corrigidas em torno de 70 Ma, mostrando a compatibilidade entre a datação por traços de fissão em apatitas e outros métodos geocronológicos, entre eles o método K-Ar (Figura 4). Isso pode ser explicado pelo fato de que, independente do material (minerais ou rocha total) utilizado para a determinação de idades, o método geocronológico K-Ar sempre apresentará temperatura de fechamento mais alta quando comparado a análise de traços de fissão em apatitas, devido à diferença de ambos quanto a termocronometria. Sendo assim, é por tal motivo que é possível (e plausível) construir uma curva de resfriamento quando tais ferramentas geo/termocronológicas encontram-se associadas.

Gráfico tempo x temperatura obtido com base em dados K-Ar e de traços de fissão em apatitas indicam uma fase de soerguimento tectônico (domeamento), marcada por um resfriamento contínuo, possivelmente associado à intrusão dique anelar e de rochas supracrustais. Segue um período marcado por um resfriamento brusco nas histórias térmicas (Figs. 3 e 4), ao redor de 60 Ma. Tal evento tectônico é de grande importância quanto à evolução termotectônica do MAPC, pois representa episódios de abatimento do conduto vulcânico e estruturação da caldeira, provavelmente ocorrido para acomodar a câmara magmática. Geomorfologicamente, reflete-se no resalto topográfico dos anéis do maciço em relação às áreas vizinhas externas, com exceção ao MSPB.

Histórias térmicas localizadas nas serras que bordejam o maciço em seu limite E-SE (Figuras 3c, d, e) registram seu aquecimento em resposta ao alçamento térmico da intrusão alcalina até cerca de 40 Ma. Isso significa que o evento de aquecimento provocado pela intrusão do dique anelar e hidrotermalismo é registrado nas

Figura 4 - Curva de resfriamento representativa da evolução do Maciço Alcalino de Poços de Caldas a partir de idades K/Ar (Sonoki & Garda, 1988) e idades de traços de fissão em apatitas (Franco, 2003).

serras que bordejam o Maciço, mas não o é no interior do mesmo. É gerada, dessa forma, uma auréola de contato na região, de forma que o aquecimento da intrusão alcalina é registrado numa área circundante ao MAPC.

Agradecimentos À FAPESP (Processo 00/03960-5) e CNPq (Pro-

cesso 464175/00-0) pelo apoio financeiro para as atividades de campo, à Fulvia Codazzi pelo auxílio na contagem e medição dos traços de fissão, a Allen H. Fetter pela correção do Abstract e ao Corpo Consultivo da RBG pelas sugestões do manuscrito.

Referências

- Almeida F.F.M. de. 1958. O Planalto Paulistano. In: Associação Geógrafos Brasileiros. *A cidade de São Paulo*. AGB, São Paulo, p. 113-167.
- Almeida F.F.M. 1964. *Fundamentos Geológicos do Relevô Paulista*. São Paulo, Inst. Geogr. e Geol., Boletim 41, p.167-263.
- Almeida F.F.M. & Carneiro C.D.R. 1998. Origem e evolução da Serra do Mar. *Rev. Bras. Geoc.*, **28**:135-150.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sci. Reviews*, **17**:1-21.
- Almeida Filho R. & Paradella W. R. 1977. *Estudo do Maciço Alcalino de Poços de Caldas através de imagens de LANDSAT com ênfase em mineralizações radioativas*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 130 págs.
- Amaral G., Bushee J., Cordani U.G., Kawashita K., Reynolds J.H. 1967. Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **31**:117-142.
- Artur A.C. 1988. *Evolução policíclica e infraestrutura da porção sul do estado de Minas Gerais e regiões adjacentes do estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, IG/USP, 215 págs.
- Bosworth W., Burke K., Strecker M. 2003. Effect of stress field on magma chamber stability and the formation of collapse calderas. *Tectonics*, **22**:1042.
- Bigazzi, G., Hadler N., J.C., Iunes, P.J., Mello, T.C.P.W.P., Navia, L.M.S., Paulo, S.R., Zuñiga, A. 1995a. Employment of thin thorium films in fission track neutron dosimetry. *Braz. J. Phys.* **25**:246-251.
- Bigazzi G., Hadler N.J.C., Iunes P.J., Odone M., Paulo S.R., Zuñiga A. 1995b. Absolute thermal neutron fluence determination by thin film of natural uranium. *Nucl. Instrum. Meth. A* **352**:588-591.
- Bigazzi G., Hadler N.J.C., Iunes P.J., Khouri M.C., Navia L.M.S., Osório, A.M.A., Paulo, S.R., Zuñiga, A. 1995c. Problems related to the employment of thin uranium films as neutron dosimeters. *Radiat. Meas.* **25**:459-460.
- Bigazzi G., Guedes S., Hadler N.J.C., Iunes P.J., Oddone M., Osório A.M.A., Paulo S.R., Zuñiga A. 1999. Potentialities and practical limitations of an absolute neutron dosimetry using thin films of natural uranium and thorium applied to the fission track method. *Radiat. Meas.* **31**:651-656.
- Bushee J. 1974. *Potassium - argon ages of some alkaline rocks from southern Brazil*. PhD. Thesis, University of California, Berkeley, 145 p.
- Campos Neto M.C. 2000. Orogenic systems from southwestern Gondwana: an approach to Brasiliano – Pan African cycle and orogenic collage in southeastern Brasil. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (ed.). *Tectonic Evolution of South America*. 31st Int. Geol. Congr., Rio de Janeiro, p. 335-365.
- Cordani U.G., Sato K., Teixeira W., Tassinari, C.C.G., Basei, M.A.S. 2000. Crustal Evolution of the South American platform. In: U. G. Cordani E. J. Milani A. Thomaz Filho D. A. Campos (ed.). *Tectonic Evolution of South America*. 31st Int. Geol. Congr., Rio de Janeiro, p. 19-40.
- Ebert H.D., Chemale Jr.F., Babinsky M., Artur A.C., Van Schmus W.R. 1996. Tectonic setting and U/Pb zircon dating of the plutonic Socorro Complex in the Transpressive Rio Paraíba do Sul Shear Belt, SE Brazil. *Tectonics*, **15**: 688-699.
- Ellert R. 1959. *Contribuição à geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas*. São Paulo, Fac. Filos. Ciên. Let./USP, Boletim 237, Geologia 18: 5 - 63.
- Fetter A.H., Hackspacher P.C., Ebert H.D., Dantas E.L., Costa A.C.D. 2001. New Sm/Nd and U/Pb geochronological constraints on the Archean to Neoproterozoic evolution of the Amparo Basemet Complex of the Central Ribeira Belt southeastern Brazil. In: South-American Symposium on Isotope Geology, 3, Pucón, *Extended Abstracts*, 36 (CD-Rom).
- Fetter A.H., Hackspacher P.C., Ebert H.D., Dantas E.L., Costa A.C.D., Teixeira W. 2003. Resultados isotópicos Sm/Nd, U/Pb e Ar/Ar dos gnaisses do embasamento na zona de interseção entre os Cinturões Brasília e Ribeira: implicações genéticas e tectônicas. In: SBG, Simp. Geol. Sud., 1, *Boletim de Resumos*, 6.
- Fleischer R.L., Price P.B., Walker R.M. 1975. *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications*. University of California Press, Berkeley, 605 pp.
- Franco A.O.B. 2003. *História Térmica e Denudação do Maciço Alcalino de Poços de Caldas (SP/MG) e adjacências: área sul*. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, 97 p.
- Garda G.M. 1990. *A alteração hidrotermal no contexto da evolução geológica do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG-SP*. Dissertação de Mestrado, IG/USP, 213 págs.
- Gallagher K., Hawkesworth C.J., Mantovani M.S.M. 1995. Denudation, fission track analysis and the long-term evolution of passive margin topography: application to the southeast Brazilian margin. *J. S. Amer. Earth Sci.*, **8**:65-77.
- Green P.F. 1988. The relationship between track shortening and fission track age reduction in apatite. Combined influence of inherent stability, annealing anisotropy, length bias and system calibration. *Earth Planet. Sci. Lett.* **89**:335-352.
- Guedes S., Hadler N.J.C., Iunes P.J., Paulo S.R., Zuñiga A. 2000. The spontaneous fission decay constant of ²³⁸U using SSNTD. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **254**:441-442.
- Guedes S., Hadler N.J.C., Iunes P.J., Zuñiga A., Tello S.C.A., Paulo S.R. 2003a. The use of the U(n,f) reaction dosimetry in the determination of the λ value through fission-track techniques. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **496**:215-221.
- Guedes S., Hadler N.J.C., Sarkis J.E.S., Oliveira K.M.G., Kakazu M.H., Iunes P.J., Saiki M., Tello S., C.A., Paulo S.R. 2003b. Spontaneous-fission decay constant of ²³⁸U measured by nuclear track techniques without neutron irradiation. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **258**:117-122.
- Guedes S., Hadler N.J.C., Iunes P.J., Tello C.A. 2004. Kinetic model for the relationship between confined fission-track length shortening and fission-track age reduction in minerals. *Nucl. Instr. Meth. B*, **217**:627-636.

- Hackspacher P.C. & Godoy A.M. 1999. Vertical displacement during late-collisional escape tectonics (Brasiliano Orogeny) in the Ribeira Belt, São Paulo State, Brazil. *J. Afr. Earth Sci.*, **29**:25-32.
- Hackspacher P.C., Fetter A.H., Ebert H.D., Janasi V.A., Oliveira M.A.F., Braga I.F., Negri F.A. 2003. Magmatismo há ca. 660-640 Ma no Domínio Socorro: Registros de Convergência Pré-Colisional na Aglutinação do Gondwana Ocidental. *Revista do Instituto de Geociências - USP. Série científica*, **3**:85-96.
- Hackspacher P.C., Ribeiro L.F.B., Ribeiro M.C.S., Fetter A.H., Hadler Neto J.C., Tello C.A.S., Dantas E.L. 2004. Consolidation and break-up of the South American Platform in Southeastern Brazil: Tectonothermal and denudation histories. *Gond. Res.*, **7**:91-101.
- Hadler N.J.C., Paulo S.R., Iunes P.J., Tello S.C.A., Balestrieri M.L., Bigazzi G., Curvo E.A.C., Hackspacher P. 2000. A PC compatible Brazilian software for obtaining thermal histories using apatite fission track analysis. *Rad. Measur.*, **34**:149-155.
- Holden N.E. & Hoffman D.C. 2000. Spontaneous fission half-lives ground-state nuclides (Technical report). *Pure Appl. Chem.* **72**:1525-1562.
- IPT - Instituto De Pesquisas Tecnológicas Do Estado De São Paulo. 1981. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo - Escala 1:1.000.000*.
- Iunes P.J. 1999. *Utilização da dosimetria de nêutrons através de filmes finos de urânio e de tório naturais na datação de minerais com o método dos traços de fissão*. Tese de Doutorado, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade de Campinas. 111 pág.
- Iunes P.J., Hadler N.J.C., Bigazzi G., Tello S.C.A., Guedes S., Paulo S.R. 2002. Durango apatite fission-track dating using length-based age corrections and neutron fluence measurements by natural thorium thin films and U-doped glasses calibrated through natural uranium thin films. *Chem. Geol.* **187**:201-211.
- Iwano H., Danhara T. 1998. A re-investigation of the geometry factors for fission-track dating of apatite, sphene and zircon. In: P. Van den haute, F. De Corte, (eds.), *Advances in Fission-Track Geochronology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp: 47-66.
- Janasi V.A., Leite R.J., Schmus W.R. 2001. U/Pb chronostratigraphy of the granitic magmatism in the Agudos Grandes Batholith (west of São Paulo, Brazil) - implications for the evolution of the Ribeira Belt. *J. S. Amer. Earth Sci.*, **14**:363-376.
- Jonckheere R. 2003. On the densities of etchable fission tracks in a mineral and co-irradiated external detector with reference to fission-track dating of minerals. *Chem. Geol.* **200**:41-58.
- Ketcham R.A., Donelick R.A., Carlson W.D. 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales. *Amer. Mineral.*, **84**:1235-1255.
- Laslett G.M., Green P.F., Duddy I.R., Gleadow A.J.W. 1987. Thermal annealing of fission tracks in apatite. 2: a quantitative analysis. *Chem. Geol. (Isotope Geoscience Section)*, **65**:1-13.
- King L.C. 1956. A Geomorfologia no Brasil Ocidental. *Ver. Bras. Geog.*, **18**:147-265.
- Lustrino M., Dallai L., Giordano R., Gomes C.B., Melluso L., Morbidelli L., Ruberti E., Tassinari C.C.G. 2003. Geochemical and Sr-Nd-O isotopic features of the Poços de Caldas Alkaline Massif (SP - MG, SE Brazil): relations with the Serra do Mar analogues. In: South Am. Symp. Isotope Geology, 4, Salvador, *Short Papers*, 593-595.
- Poupeau G & Soliani Jr. E. 1988. Geocronologia e geoquímica pelo método dos traços nucleares: alguns exemplos em geologia aplicada. IG/ USP, *Boletim Série Científica*, (19):47-61.
- Roger F., Arnaud N., Gilder S., Tapponnier P., Jolivet M., Brunel M., Malarieille J., Yu A., Yang J. 2003. Geochronological and geochemical constraints on Mesozoic suturing in east central Tibet. *Tectonics*, **22**:1037-1041.
- Schullmann A., Carvalho A., Valetton I. 1997. Bauxite of Poços de Caldas. In: A. Carvalho, B. Boulangé, A. J. Melfi, Y. Lucas, Y. (eds). *Brasileian Bauxites*. São Paulo/SP: USP, FAPESP. 331 pág.
- Sonoki I.K. & Garda G.M. 1988. Idades K/Ar de Rochas Alcalinas do Brasil Meridional e Paraguai Oriental: Compilação e Adaptação a novas constantes de decaimento. Instituto de Geociências/ USP, *Boletim Série Científica*, (19):63-85.
- Tello C.A.S. 1998. *Estudo de annealing de traços de fissão em apatitas, tanto em seções basais quanto em seções sem orientação preferencial, análise dos comprimentos dos traços de fissão*. Tese de Doutorado, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade de Campinas, 111 pág.
- Tello C.A.S., Hackspacher P.C., Hadler Neto J.C., Iunes P.J., Ribeiro L.F.B., Paulo S.R. 2003. Recognition of Cretaceous, Paleocene and Neogene tectonic reactivation through apatite fission track analysis in Precambrian areas of southeast Brazil: association with the opening of south Atlantic Ocean. *J. S. Am. Earth Sci.*, **15**:765-774.
- Ulbrich M.N.C. 1983. *Aspectos mineralógicos e petrológicos de nefelina sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG - SP*. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 369 pág.
- Ulbrich M.N.C. 1993. Mineralogy of nepheline syenites from the Poços de Caldas Alkaline Massif, SE Brazil: chemistry, X-Ray data and microtextures of feldspars. *Rev. Bras. Geoc.*, **23**:388-399.
- Ulbrich H.H. & Ulbrich M.N.C. 1992. O Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG - SP: características petrográficas e estruturais. In: SBG/ Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo, *Roteiro de Excursões*. 64 pág.
- Ulbrich H.H. & Ulbrich M.N.C. 2000. The lujaevite and khibinite bodies of the Poços de Caldas Massif, southeastern Brazil: a structural and petrographical study. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**:615-622.
- Valetton I., Schullmann A., Vinx R., Wieneke M. 1997. Supergene alteration since the upper cretaceous on alkaline igneous and metasomatic rocks of the Poços de Caldas ring complex, Minas Gerais, Brazil. *App. Geochem.*, **12**:133-154.
- Veríssimo C.V. 1991. *Evolução geológica dos corpos de protominério e mineralizações de manganês associadas - porção leste de São Paulo e sul de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, 164 pág.
- Vlach S.R.F., Vilalva F.C.J., Ulbrich M.N.C., Ulbrich H.H.G.J., Vasconcelos P.M. 2003. Phlogopite from carbonatitic veins associated with the Poços de Caldas Alkaline Massif, SE Brazil: Mineralogy and Ar/Ar dating by the laser step heating method. In: South American Symposium on Isotope Geology, 4, Salvador, *Extended Abstracts*, 702-705.
- Wagner G. & Van Den Haute P. 1992. *Fission Track Dating*. Kluwer Academic Publishers, 283 pp.

Manuscrito A-1518

Recebido em 05 de julho de 2004

Revisão dos autores em 01 de julho de 2005

Revisão aceita em 11 de julho de 2005