

Serviço Geológico do Brasil
Diretoria de Geologia e Recursos Minerais - DGM
Coordenação de Geocronologia - DEGEO

**GUIA DE PROCEDIMENTOS DO SGB PARA AMOSTRAGEM E SELEÇÃO DE
MÉTODOS GEOCRONOLÓGICOS APLICADOS AO MAPEAMENTO REGIONAL**

(Versão 1.0)
Março de 2005



Secretaria de Geologia Ministério de
Mineração e Transformação Mineral Minas e Energia



1. Diretrizes Gerais

Uma das práticas que podem fazer a diferença em um programa geocronológico da envergadura prevista é o estabelecimento de procedimentos padrões para coleta, armazenamento, organização de amostras e priorização das análises. Obviamente que estes cuidados não se aplicam exclusivamente à geocronologia, são igualmente importantes para amostragem com qualquer finalidade. Entretanto, em geocronologia, devido às repercussões imediatas nos resultados e os elevados custos, as precauções devem ser maiores. Objetivando uniformizar os procedimentos de amostragem e orientar na escolha dos métodos e técnicas geocronológicas mais adequadas à solução dos problemas identificados, apresentamos abaixo as orientações necessárias, muitas das quais de pleno conhecimento da maioria.

Todos os esforços no planejamento da amostragem visam evitar a introdução de fatores passíveis de levantar dúvidas sobre a qualidade do dado analítico e postergar, as vezes por vários anos, a sua contextualização. Por isso, os cuidados com a amostragem devem beirar à obsessão, permitindo a eliminação de um dos fatores mais usuais de questionamento dos resultados. Para tanto é necessário a obtenção de farta documentação fotográfica, incluindo fotografias amplas do afloramento (detalhes meso-estruturais), detalhe do local de coleta, de um fragmento de amostra e fotomicrografias (detalhes estruturais, texturais e da homogeneidade composicional).

À preparação das amostras não deve ser dedicada menos atenção. Apenas para se ter uma idéia dos cuidados com a preparação, alguns laboratórios como o do Serviço Geológico do Canadá, embora aceitem fazer análises de rochas coletadas por terceiros, exige que a preparação seja feita exclusivamente em seu laboratório. O tópico preparação não será detalhado no presente texto, devendo merecer uma futura abordagem.

1.1 Como, quando, onde e quanto amostrar

Além dos cuidados locacionais de praxe, com determinação precisa do local (através de GPS de precisão), os cuidados mais essenciais para a obtenção de idades radiométricas confiáveis são: i) Definição precisa das relações estruturais e estratigráficas em campo; ii) Estudo microscópico detalhado, acompanhado de análise química para definição precisa do protólito; iii) Relativamente a rochas bandadas (migmatitos), ortognaisses (especialmente TTGs) e plútons acamadados, recomenda-se cuidados redobrados no sentido de obtenção de amostras petrográfica e estruturalmente homogêneas, evitando coleta de material de natureza mista. Além disso, especialmente para datações pelo método U-Pb e Pb Evaporação, em nenhuma hipótese deve-se coletar a amostra em afloramentos distintos, ou em bandas distintas em um mesmo afloramento, ou ainda em pontos muito distantes em grandes exposições como cortes de rodovias ou frentes de pedreiras. Tratar zircões de diferentes amostras como uma população única pode levar a erros grosseiros na determinação e/ou na interpretação das idades. Nesses casos, mesmo que as distintas porções amostradas em conjunto sejam por pura sorte co-magmáticas, as dúvidas levantadas a *posteriori* poderão levar à não utilização de um dado correto, principalmente no caso de o resultado ser muito destoante do quadro de tempo estabelecido para a unidade.

Nunca é demais enfatizar que a geocronologia não deve ser empregada antecipadamente a outras ferramentas mais abrangentes. É bom lembrarmos a retomada dos trabalhos de mapeamento na década de 80 (PLGB). Naquela fase inicial observou-se o emprego massificado de análises de ETR, à época uma novidade analítica, procedimento que gerou expectativas (exageradas) de simplificar o processo de reconhecimento de protólitos e de discriminação entre unidades cartográficas distintas. Essa prática, além de causar diversos problemas interpretativos e cartográficos, representou uma elevação considerável dos custos analíticos em alguns projetos. Portanto, são os mapas bem elaborados, com o apoio de diversas ferramentas, em especial a “velha” petrografia

microscópica e estrutural, que devem pautar o planejamento das análises geocronológicas, e não o inverso.

I.2 Precauções gerais na coleta

- ? As amostras devem ser absolutamente frescas (não intemperizadas), independente do método, inclusive para análises de zircão;
- ? Gnaisses bandados tipo TTGs, migmatitos, complexos plutônicos acamadados: amostrar cuidadosa e separadamente a(s) banda(s) alvo(s); **nunca** amostrar duas bandas contíguas (ver diversos exemplos no Capítulo III);
- ? Granitóides e ortognaisses muito rico em pórfiros: amostrar preferencialmente a matriz (uma vez que os minerais ricos em U e terras raras ocorrem preferencialmente nos acessórios); para casos de extremo enriquecimento em pórfiros (> 80%), amostrar o dobro do volume normal;
- ? Para minimizar as possibilidades de contaminação na fase de moagem, é recomendado quebrar-se a amostra no próprio afloramento, na forma de fragmentos do tamanho de um punho (humano) Acondicionar as amostras em recipientes resistentes e armazenar em caixas apropriadas para futuro transporte. São também necessários os cuidados de praxe para evitar-se perda e mistura e apagamento de etiquetas, etc.

1.2.1 Amostras para datação pelo método U-Pb

- i) Rochas magmáticas félsicas/intermediárias (metamorfizadas ou não); rochas sedimentares e metassedimentares clásticas: metarenitos, metagrauvas, etc:
 - ? Coletar cerca de 10 kg por amostra;
 - ? Coletar preferencialmente na forma de 15 fragmentos do tamanho de um punho humano (que correspondem à cerca de 600 g cada)
 - ? Coletar mais duas amostras com as dimensões de um punho cada, sendo uma para a confecção da lâmina e do tablete e a outra para análise química (Fig. I.1).
- ii) Rochas magmáticas máficas (metamorfizadas ou não)
 - ? coletar 50 kg ou mais

1.2.2 Amostras para datação pelo método Sm-Nd

- i) para obtenção de idades-modelo (rochas máficas, metamorfizadas ou não), obtenção da idade de metamorfismo e idade de fontes (meta) sedimentares.
 - ? 2 ou 3 amostras do tamanho de um punho.
- ii) para idades isocrônicas
 - ? 6 amostras do tamanho de um punho, em domínios com distintas fácies, texturas, granulação etc, que tenham mais possibilidade de apresentar dispersão nas razões isotópicas, permitindo a obtenção de idades isocrônicas.

I.3 Protólito bandado, cuidado redobrado

Devido à importância da correta determinação do protólito e classificação precisa da amostra é importante mais uma vez ressaltar que, se a amostragem não tiver sido precedida dos devidos cuidados, os eventuais (distintos) episódios de geração de zircões em uma mesma amostra não poderão ser seguramente reconhecidos, podendo a interpretação dos resultados induzir a erros grosseiros. Esses cuidados são mais cruciais em gnaisses bandados policíclicos ou não, onde a mistura e herança isotópicas são particularmente comuns. Por este motivo, migmatitos, gnaisses bandados, associações TTGs, plútons acamadados devem merecer atenção redobrada na coleta. A prática tem mostrado que em vários terrenos gnáissicos abordados a principal carência de conhecimento não era relacionada apenas à falta de acurácia das análises geocronológicas disponíveis, ou à sua ausência. Mas, também à (falta de) "acurácia" petrológica na

classificação dos protólitos dos ortognaisses bandados, em especial, dos TTGs; muitas vezes cartografados e/ou interpretados das formas mais variadas.

Portanto, problemas conceituais e petrogenéticos devem ser resolvidos previamente à qualquer programa de amostragem, para evitar o risco de não se saber o que foi coletado e menos ainda, o significado da idade. Além disso, como o executor das análises via de regra não participa da coleta é necessário uma padronização das descrições e classificações petrográficas em escala nacional, particularmente amostras metamórficas (de médio e alto grau) para as quais deve ser adotada uma nomenclatura dupla. Ou seja, além de uma designação descritiva dada pela sucessão de minerais essenciais e diagnósticos, esses metamorfitos devem ser também classificados geneticamente. Por exemplo, a nomenclatura padrão de uma rocha do tipo "sillimanita-granada-biotita-plagioclásio-quartzo gnaiss" deve ser seguida da designação genética ("metagrauvaca"). Além disto, ainda por motivos de padronização, deve ser evitado o emprego de termos exóticos e/ou /ou carentes de precisão para os protólitos (e.g. kinzigito, khondalito). Quando o grau de metamorfismo e/ou recristalização não mais permitir a reconstituição do protólito, a designação genética e conseqüentemente a análise não deve ser tentada.

1.3.1 Migmatitos I e S e seus produtos residuais e anatéticos

Em primeiro lugar, devemos lembrar que migmatito não é uma rocha, é apenas um conceito petrológico, quando os processos envolvidos na sua gênese são bem caracterizados, passam a constituir uma associação litológica muito interessante do ponto de vista isotópico. Portanto, da mesma forma que não se espera que ninguém tente cartografar um conceito (e sim suas partes essenciais), também se espera que ninguém colete uma amostra de migmatito para datação. Como a associação envolve diversos componentes não necessariamente co-genéticos, o processo gerador deve ser compreendido e seus componentes fundamentais discriminados previamente à coleta, o que nem sempre é fácil, ou mesmo possível. Assim, a mostra alvo só deve ser encaminhada para datação se puder ser previamente discriminada como:

- i) gnaiss regional (paleo/mesosoma) pouco ou não afetado pelo processo, ou;
- ii) produto da fusão/injeção (leucossoma *in situ*, leucossoma alóctone e granitóide anatético) ou;
- iii) restito da fusão (melanosoma).

A compensação para todos esses cuidados, é que quando bem caracterizado, esse sistema polifásico fornece informações fundamentais para o entendimento da evolução estrutural e geotectônica, através datação determinação das idades da rocha encaixante regional (protólito), as idades de suas área(s)-fonte(s) e do pico metamórfico/colisional (no caso de migmatização *in situ*).

1.3.2 Ortognaisses bandados, especialmente TTGs em zonas de alto strain

As dificuldades e os conseqüentes cuidados na coleta para obtenção de amostras petrográfica e estruturalmente homogêneas são também aplicáveis para gnaisses bandados (não migmatíticos), especialmente TTG, que normalmente apresentam bandamento tonalítico-trondhjemitico, complicado por intercalações de gnaisses anfibolíticos (metamáficas tholeiíticas). Essa estruturação primária complexa torna-se mais intrincada com a sobreposição de eventos metamórfico-deformacionais, não raras vezes superpostos. Em função dessas peculiaridades os mesmos podem ser freqüentemente confundidos com diversos tipos de associações, especialmente para ou orto migmatitos *in situ*, onde o componente leucocrático (trondhjemitico) pode ser confundido com o leucossoma.

Em domínios de *strain* baixo a moderado alguns desses erros de classificação puderam ser detectados simplesmente por meio de observações de campo. Entretanto, em domínios de *strain* alto, devido à transposição das estruturas pretéritas, os limites entre

as bandas composicionais originais e venulações tardias podem não ser mais discrimináveis, dando origem a gnaisses de composição “homogênea”. Nos trabalhos de campo executados previamente à amostragem, em diversas regiões essas associações foram cartografadas como: i) associação metavulcano-sedimentar tipo *greenstone belts*; paragneisse grauvaqueano associação metavulcano-sedimentar dacítica; complexo gabro-anortosítico acamadado. Ortognaisses charnockíticos granulizados, também podem ser confundidos com paragneisses. Nesses casos, foram necessários estudos microscópicos detalhados para a identificação segura dos protólitos, previamente à execução das análises.

É claro que em associações TGGs s.s., a alternância de bandas tonalíticas (cinza) e trondjemíticas (branca) pode ser uma feição primária, relacionada à cristalização de duas fases co-genéticas, e portanto, com o mesmo sistema isotópico. Assim, teoricamente, a amostragem conjunta dessas duas bandas, mesmo em áreas de alto *strain* não representaria uma amostra mista e poderia ser datada apropriadamente. Entretanto, dificilmente a composição da banda branca (supostamente trondjemítica) pode ser determinada em afloramento. Muitas vezes trata-se de bandas de leucogranitóides anatéticos e leucossomas *in situ* ou de injeção, associados ao pico metamórfico-anatético de um evento superposto. Portanto, quando o objetivo da coleta for a datação da fase mais antiga, especialmente em áreas de difícil acesso ou retorno incerto no decorrer do projeto, sempre amostrar a banda tonalítica, menos suscetível de ser erroneamente classificada em afloramento.

2. Para cada problema, o método e a técnica adequada

2.1 Introdução

As dificuldades na obtenção do número previsto de análises para o PGB, bem como os custos analíticos envolvidos, exigem um rigoroso planejamento para maximizar os benefícios dessa importante ferramenta. O conhecimento das vantagens e limitações de cada um dos métodos para a solução de cada problema específico pelas equipes executoras das folhas, é o primeiro passo para o sucesso do planejamento geocronológico em escala nacional.

A tabela 1 é uma listagem dos mais importantes materiais geológicos passíveis de serem empregados em datações geocronológicas e o(s) métodos geocronológicos correspondentes.

Tabela 1 Materiais passíveis de serem empregados em datações radiométricas pelos principais métodos/técnicas

<u>Método/sistemática</u>	<u>Materiais passíveis de serem datados</u>
U-Pb ID-TIMS-TIMS	Minerais de U ou Th, zircão, titanita, monazita, xenotima, rutilo, badeleíta, apatita, allanita, pirocloro
U-Pb	Isótopos de U, Th, Pb, S, O, encontrados nos minerais: zircão, monazita, xenotima, rutilo, epidoto, badeleíta (ZrO ₂), titanita, apatita, allanita, pirocloro, perovskita, coesita, outros minerais de U ou Th e sulfetos,
SHRIMP	Análises por laser <i>ablation</i> U-Pb: mesma amplitude de possibilidades do SHRIMP; análises Lu-Hf <i>in situ</i> .
U-Pb	Caso a entrada da amostra no plasma ocorra sob a forma de solução é possível a execução de análises multi-elementares como determinação de elementos traços ao nível de ppb em material geológico ou em material rochoso, vidros, minerais, e inclusões fluidas e diversos líquidos.
LA-ICP-MS	Zircão
Pb-Pb Evaporação	Datação direta de sulfetos e óxidos (elementos siderófilos e calcófilos): pirita, calcopirita, platinóides, molibdenita (MoS ₂ , rico em Re), sulfetos magmáticos de Cu e Ni, rochas máfico-ultramáficas, folhelhos negros. (Idades-modelos)
Re-Os	Muscovita, biotita, flogopita, lepidolita, hornblenda, actinolita, allanita, feldspatos, glauconita (sedimentos), rocha-total (vulcânicas), alguns vidros e laterizações (alunita, jarosita e criptomelano) argilas, adulária
K-Ar	Mesmos materiais datados pelo método K-Ar
Ar-Ar	Rochas ígneas com fracionamento da razão Rb/Sr, esfeno e titanita (razão ⁸⁷ Sr / ⁸⁶ Sr) inicial, micas, feldspatos-K; apatita, Rochas carbonáticas (idades modelos Sr-Sr)
Rb-Sr	Rocha-total com fracionamento das razões Sm/Nd (rochas máficas-ultramáficas, granitóides, sedimentares e seus derivados metamórficos). Minerais com fracionamento das razões Sm/Nd: granada, piroxênio, titanita, plagioclásio, apatita, scheellita, cassiterita, fluorita
Sm-Nd	Mesmos minerais que o método Sm-Nd e zircão para a composição isotópica inicial do Hf
¹⁷⁶ Lu- ¹⁷⁶ Hf	Zircão, apatita, titanita, granada, epidoto, vidro vulcânico
²³⁸ U Traço de fissão	Galena ou outros minerais de Pb, sulfetos, magnetita, feldspato-K, telurídios, carbonatos em carbonatitos
Pb-Pb	

De todos esses, serão abordados os métodos e técnicas mais empregados em cartografia geológica básica: i) ID-TIMS (*Isotopic Dilution - Thermal Ionization Mass Spectrometry*); ii) SHRIMP (*Sensitive High Resolution Ion Mass Spectrometry*); iii) LA-ICP-MS (*Laser Ablation - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry*); iv) Pb-Pb evaporação; v) Sm-Nd

2.2 O método U-Pb

O método U-Pb é presentemente a mais poderosa e ampla ferramenta geocronológica. E, o zircão, - devido à sua ampla distribuição na maior parte das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas e às suas características isotópicas - constitui-se no principal e freqüentemente único acesso à história mais remota da crosta terrestre. A alta temperatura de bloqueio (~800 °C), aliada à propriedade de preservação do sistema isotópico U-Th-Pb fechado por domínios, permite a discriminação dos eventos mais velhos dos mais novos, sempre que o evento mais novo alcançou equilíbrio, mesmo sob estágios avançados de fusão parcial, ou de metamorfismo de alta P e T. Por isso, nos meios geocronológicos esse mineral recebe o mesmo atributo popularmente imputado ao diamante: "*Zircão é para sempre*" predicado didaticamente ilustrado nas imagens das Fig. 2.1 e 2.2, respectivamente dos zircões policíclicos arqueanos do Gnaiss Caraíba, BA e do Gnaiss Acasta (Canadá). O último, um marco da geocronologia internacional por representar a rocha (até o presente) mais antiga datada na Terra

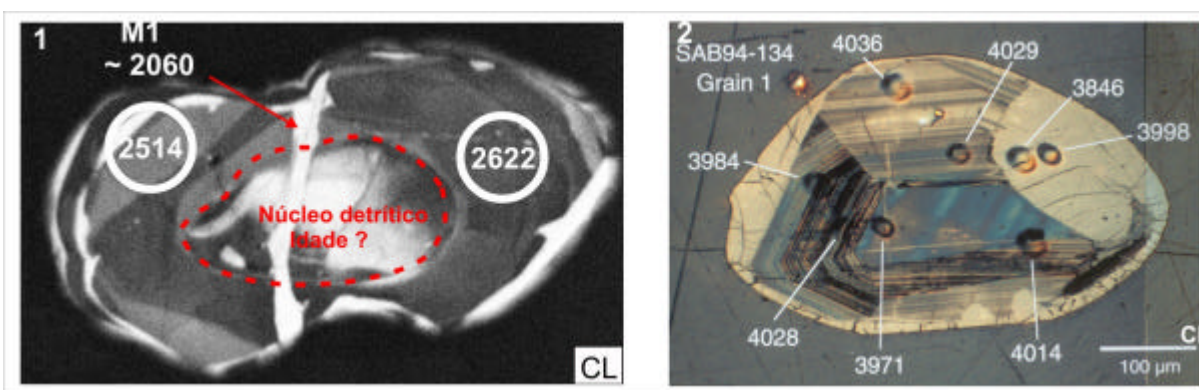


Figura 1 "Zircão é para sempre": Mesmo diminutos cristais de zircão podem guardar evidências de diversas fases de crescimento sobrepostas em escala sub-micrométrica, caracterizando a preservação do sistema isotópico U-Th-Pb fechado por domínios. Com o estudo de imagens pancromáticas (CL) previamente à análise em equipamento SIMS, é possível a identificação e exclusão de domínios heterogêneos (mistos) para a determinação da idade. Nesses casos, datações por diluição isotópica não permitem evitar a análise dos domínios mistos, fornecendo idades destituídas de significado geológico. (Charnockito Granulítico do Complexo Caraíba, BA / Idade de cristalização ~ 2650 Ma, idade de metamorfismo ~ 2080 Ma, Núcleo detrítico herdado, não datado (Imagem CL reproduzida de Silva 2005)

Figura 2 Mesmo em se tratando da rocha mais velha da Terra, o Gnaiss Acasta do Canadá, é possível com a técnica SHRIMP encontrar cristais que preservam a idade do magma precursor do gnaiss (~4030 Ma), ainda que a rocha tenha experimentado 3 eventos metamórficos arqueanos na fácies anfibolito ou acima. Essa rocha é cerca de 600 m.a. mais velha que o tonalito gnáissico São José, a mais antiga rocha já encontrada no Brasil (Dantas et al., 2003) (Imagem CL, Cortesia Richard Armstrong)

Com a entrada em funcionamento da Rede **GEOCHRONOS**, o SGB proporcionará ao seu quadro de pesquisadores a possibilidade de utilização das sistemáticas técnicas mais adequadas aos estudos geocronológicos. Com isso torna-se necessário discutir com algum detalhe as vantagens e limitações de cada uma das 3 técnicas mais utilizadas. Genericamente falando, o espectro de problemas geocronológicos (idade de cristalização, idade de metamorfismo, hidrotermalismo, etc) que pode ser resolvidos pelo tanto pela sistemática TIMS quanto por microsondas iônicas de ionização secundária (SIMS) como SHRIMP, LA-ICP-MS, Cameca, e NanoSims é o bastante similar.

Em um breve histórico deve-se destacar que a partir da década de 1980 a geocronologia passou por uma fase de incorporação de importantes avanços tecnológicos que elevaram as geociências a um novo patamar. Na sistemática TIMS foram introduzidas a partir de uma série de estudos pioneiros de Krogh e sua equipe, técnicas inovadoras na preparação de amostras, como a abrasão a ar dos cristais para remover a superfície externa, permitindo um incremento da concordância analítica, pela eliminação das bordas alteradas dos cristais. Com isso a partir de meados da década tornou-se possível a obtenção de análises de zircões arqueanos com erro de ± 1 Ma (0.1%). Além disso, a redução acentuada dos brancos analíticos permitiu a obtenção de análises mais precisas em cristais individuais, ou mesmo em parte de grãos (Krogh, 1982).

Nessa mesma época também verificou-se um amadurecimento das novas tecnologias analíticas em espectrômetros de massa de ionização secundária. Esse avanço decorreu das altas performances e produtividade das microssondas iônicas de grande porte com alta sensibilidade e resolução de massas e espacial (SHRIMP II). Esse equipamento concebido, construído e aperfeiçoado na *Research School of Earth Sciences* da *Australian National University ANU* estão hoje instalados na Austrália (4), Japão (2), EUA (1) Canadá (1) e China (1). O Brasil é o próximo país a incorporar esses avanços.

A razão principal do sucesso da nova técnica relaciona-se principalmente à sua alta resolução espacial, uma vez que rochas e amostras podem ser, heterogêneas em qualquer escala, porque mesmo diminutos cristais podem guardar evidências de diversas fases de crescimento sobrepostas em escala sub-micrométrica (Figs. II.1, II.2). Assim, somente com o estudo prévio de imagens de CL e BSE e análises pelas técnicas SIMS é possível a identificação e exclusão de domínios heterogêneos (mistos) do cálculo das idades.

Abaixo apresentamos em detalhe um estudo comparativo das performances das 3 técnicas mais avançadas em geocronologia U-Pb, ID-TIMS, SHRIMP e LA-ICP-MS visando permitir uma escolha da técnica de forma mais segura.

2.2.1 ID-TIMS versus SHRIMP

A técnica TIMS - A técnica TIMS é também referida como "convencional" (via úmida) no sentido de que a mesma é a mais madura frente às "novas" técnicas, baseadas em ionização secundária (SIMS). Além disso, após 3 décadas de aperfeiçoamento contínuo da técnica SHRIMP, está chegando o tempo em que ela também deverá passar à ser referida como "convencional" frente às demais técnicas SIMS (LA-ICP-MS, NanoSims e Cameca).

Principais vantagens comparativas da técnica TIMS - A alta precisão analítica das análises por diluição isotópica constitui-se na sua maior vantagem comparativa, sendo essa técnica insuperável em estudos geocronológicos de altíssima precisão, que demandem em erros na ordem de 0,1% e eventualmente menores, em amostras de qualquer idade. Por isso é especialmente indicada em estudos como: determinações precisas de cronoestratigrafia magmática em rochas de qualquer idade; comparação detalhada das trajetórias P-T-t e discriminação de terrenos; idades de evento mineralizadores e de suas encaixantes magmáticas, calibração de padrões para uso em equipamentos SIMS, etc.

Principais limitações da técnica TIMS - Apesar da alta precisão, a sistemática apresenta algumas desvantagens comparativas, em especial: i) Exigência de laboratórios ultra limpos; ii) Os procedimentos são lentos (uma datação por semana, contra cerca de até 2-3 por dia no SHRIMP); iii) O volume do material datado é relativamente grande (o cristal inteiro); iv) A mostra é totalmente dissolvida (método destrutivo), não permitindo repetição; v) Baixa resolução espacial e baixa acurácia geológica em domínios heterogêneos. No caso de herança e/ou zircões com morfologias internas muito complexas, as análises podem representar a composição média de misturas e não uma idade geológica; vi) impossibilidade de obtenção rotineira de idades de populações múltiplas (i.e. sedimentos). vii) impossibilidade de preservação da amostra

A técnica SHRIMP - A microsonda iônica SHRIMP é um equipamento SIMS de grande porte que utiliza uma fonte primária, constituída por um feixe de elétrons de alta energia (via de regra O_2^-). uma amostra diminuta de (25 μ m de diâmetro por 2-3 μ m de profundidade) é coletada em função da incidência desse feixe a 45°.

Principais vantagens comparativas da técnica SHRIMP - A grande variedade de materiais geológicos passíveis de serem analisados pela sistemática SHRIMP como zircão, monazita, titanita, rutilo, badeleíta, perovskita, xenotima, S e Pb, O, Ti em sulfetos (aplicação em estudos metalogenéticos). Além disso, determinações pontuais de elementos terras-raras e outros elementos-traços, mostram a extrema versatilidade da metodologia. Entretanto, é a alta resolução espacial em escala μ m, possibilitando a seleção de domínios homogêneos em cristais com estrutura interna complexa resultante da superposição de várias fases de crescimento (notadamente o zircão). Como conseqüência, a possibilidade de obtenção de análises pontuais, aliadas à rapidez analítica fornecem à sistemática SHRIMP sua mais importante vantagem comparativa e os mais consistentes avanços no conhecimento da evolução geológica proporcionando um salto qualitativo importante no conhecimento da evolução geológica e nos controles de depósitos minerais em escala global.

Principais limitações da técnica SHRIMP - Um dos maiores problemas operacionais da técnica, previamente mencionado, relaciona-se ao “efeito-matriz”, demandando a calibração das análises obtidas nos zircões a serem datados, contra análises de zircões padrões, inseridos no mesmo recipiente das amostras (*mount*). A dificuldade principal é que para a obtenção da acurácia desejável, com uma diferença máxima de 1% em relação a uma análise TIMS, é necessário o uso de zircões padrões naturais, cuidadosamente selecionados, que ocorram em quantidades que permitam a realização de milhares de análises.

Outra limitação importante que inibe a universalização da técnica são os altos custos do equipamento, em torno de US\$ 3,000,000,00, cerca de 3 vezes o custo de um espectrômetro TIMS ou de um equipamento LA-ICP-MS.

Acurácia geológica (TIMS x SHRIMP) - Em uma análise individual TIMS a medição da idade consome um volume muito maior de material (o cristal inteiro) quando comparada ao volume de material analisado em um *pit* SHRIMP, representando uma composição média do cristal isotopicamente diluído. Por isso em caso de cristais morfológicamente complexos uma análise TIMS representa porções isotopicamente heterogêneas e, apesar da maior precisão da técnica, as idades são menos acuradas podendo ser destituídas de significado geológico.

Como a sistemática SHRIMP é baseada na análise de diminutas porções de material em um contexto espacial diminuto, somente uma pequena fração do cristal é atingida pelo feixe e destruída para análise. Essa peculiaridade confere à técnica a sua alta resolução espacial e maior acurácia geológica, possibilitando que idades obtidas em domínios individuais possam ser previamente testadas, possibilitando a rejeição de análises em domínios afetados por discordância ou herança. Por isso, possibilita que a idade média de uma população obtida em domínios individuais possa ser previamente testada, permitindo a rejeição de análises em domínios afetados por discordância ou herança. Dessa forma, a população agrupada será sempre uniforme permitindo que o tratamento estatístico possa fornecer uma idade agrupada homogênea, acurada e precisa, impossível de reprodução por diluição isotópica na mesma amostra.

Em resumo, como regra geral a sistemática TIMS deve ser solicitada:

- i) quando for necessário resultados de alta precisão e a amostra seguramente não tiver idades mistas, metamorfismo de alto grau e herança isotópica;
- ii) para a determinação de idades precisas de mineralizações;
- iii) para a determinação de idades precisas de encaixantes de mineralizações;
- iv) para datações de unidades regionais veios e outros tipos de intrusões magmáticas em distritos mineiros;
- v) para estabelecimento de cronoestratigrafia magmática e evolução orogênica em distritos mineiros;
- vi) quando forem necessárias datações precisas para discriminação entre eventos magmáticos em terrenos suspeitos, etc.

Deve ser escolhida a sistemática SHRIMP quando se conhece ou se suspeita da origem mista e/ou policíclica da amostra, demandando análises com maior acurácia (maior resolução espacial) em:

- i) rochas magmáticas vulcânicas e plutônicas contendo herança isotópica;
- ii) rochas metamórficas de médio e alto grau nas quais tenha ocorrido modificação na morfologia interna dos zircão e/ou crescimento de novos cristais, implicando abertura parcial ou total do sistema isotópico U-Th-Pb;
- iii) sistemas hidrotermais onde co-existam minerais novos e antigos (além do zircão, titanita, xenotima, rutilo, monazita);
- iv) sedimentos consolidados ou não, e rochas metassedimentares;
- v) datação da diagênese em rochas sedimentares e metassedimentares (xenotima);
- vi) datação *in situ* de kimberlitos (zircão e perovskita); depósitos de bauxita (zircão, rutilo e monazita).

Em casos de rochas policíclicas que exijam determinações com precisão e acurácia muita altas, mas caracterizadas por zircões portadores de núcleos herdados, ambas as técnicas podem ser empregadas simultaneamente. Uma primeira análise SHRIMP com identificação de uma população homogênea e livre de herança pode ser complementada em escala regional por diversas análises TIMS ou mesmo pelo método Pb-Pb por evaporação. Além disso, monazita ou titanita (co-magmáticas) livre de herança pode ser datada diretamente por TIMS.

2.2.2 SHRIMP versus LA- ICP-MS

A microsonda Finnegan, modelo Neptune, adquirida pela Rede GEOCHRONOS apresenta uma vasta gama de aplicações em geoquímica isotópica e convencional, sendo um equipamento de altíssima versatilidade. No caso de análises por via úmida, com a entrada da amostra no plasma sob a forma de solução, é possível a execução de análises multi-elementares como determinação de elementos traços ao nível de ppb, em material geológico ou em material rochoso, vidros, minerais, e inclusões fluidas. Pode dessa forma ter uma ampla aplicação, em especial, para: i) Óleo e gás: análises isotópicas de S, O e C e químicas em fases minerais para estudos diagenéticos com ênfase em rochas reservatório; ii) Mineração: análises isotópicas de S, O e C em minerais para estudos metalogenéticos; iii) Meio ambiente: Monitoramento ambiental em áreas de exploração de petróleo; Monitoramento ambiental a partir da análise de elementos traço e razões isotópicas (identificação de fontes de poluição); Estudos de remediação de áreas degradadas. Apesar dessa amplitude e versatilidade, o presente texto pretende explorar apenas sua aplicação geocronológica através de datações do sistema U-Pb, por meio da técnica de ablação à laser.

A técnica LA- ICP-MS - O LA é um equipamento acessório ao ICP-MS, permitindo, em tese, que qualquer sólido seja analisado de forma direta, amostras sólidas (minerais, pastilhas de rocha prensada ou fundida com metaborato de sódio, polímeros, metal) sem passar por processo de dissolução úmida. É acoplado a um microscópio petrográfico, permitindo a escolha precisa do domínio pontual restrito que se pretende analisar. Além disso, pode-se analisar uma pequena região da amostra (25-50 μ m).

A ablação a laser, da mesma forma que outras técnicas SIMS, beneficiou-se dos avanços instrumentais proporcionados pela massificação da sistemática SHRIMP em escala mundial. Os atuais LA-ICP-MS, multicoletor de alta resolução, cobrem praticamente todo o espectro de possibilidades analíticas do SHRIMP. Da mesma forma que o SHRIMP, o LA baseia-se na análise iônica a partir extração direta dos íons que são extraídos da superfície da amostra, gerando um feixe iônico secundário, posteriormente datado no espectrômetro de massas. Baseia-se na incidência de um laser de alta energia para abrasar (*ablate*) a amostra, gerando um feixe molecular na forma de um aerosol de sólido mais gás de argônio ("fumaça"), a partir do *spot* alvo, proporcionando análises *in situ*, daí sua alta resolução espacial possibilitando seu emprego em geocronologia U-Pb. O processo de abrasão é separado do processo de ionização, o que permite que ambos possam ser otimizados. Além disso, não há necessidade da geração de vácuo na câmara que contém a amostra. A "fumaça" alimenta uma célula de mistura para retenção do sinal, sendo a amostra então dissociada e ionizada em um plasma de alta temperatura, antes de ser analisada em um setor magnético quadrupolo do espectrômetro de massas. As profundidades dos *pits* são de 2/3 μ m. Dessa forma, fornece datações U-Pb de maneira similar à sistemática SHRIMP, porém quanto às dimensões e formas dos *pits* analíticos é mais versátil.

Principais vantagens comparativas da técnica LA-ICP-MS - Em uma abordagem inicial, vale para o LA-ICP-MS as mesmas indicações geológicas sugeridas para o SHRIMP: trata-se de uma técnica com alta resolução espacial, permitindo a datação de cristais com morfologias complexas e podendo tirar vantagens da escolha dos pontos e domínios para datação a partir de estudos de imagens de CL e BSE. Porém, relativamente à técnica SHRIMP, o LA-ICP-MS apresenta como principal vantagem comparativa o curto intervalo de tempo analítico, que têm a duração de aproximada de 2 minutos, enquanto no SHRIMP esse tempo é de cerca de 15 a 17 minutos, resultando em análises com custos muito menores. Assim, para estudos de proveniência em sedimentos, rochas sedimentares e metassedimentares, o desempenho do ICP-MS é muito mais eficiente, pois pode ser calibrado para executar análises nos cristais detríticos a uma velocidade 5 a 10 vezes maior que a do SHRIMP, vantagem que permite datar em um turno de 24 horas cerca de 220 zircões, contra 30-40 pelo método SHRIMP. Além disso, os "*pits*" podem ter formas e diâmetros diversificados, variando de 20 a 200 μ m de diâmetro, daí sua maior versatilidade relativamente ao SHRIMP para o caso de análises *in situ*

Previamente ao desenvolvimento dos equipamentos multicoletores só era possível a obtenção das idades nos LA-ICP-MS apenas a partir das razões $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, com precisão de 0.5 para amostras arqueanas a 6% para amostras fanerozóicas. Como ocorre com o método Pb-Pb evaporação que permite a determinação apenas das razões $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, não permitindo a certificação do estado de concordância da análise (devido à impossibilidade de determinação da razão U/Pb), essas análises antigas forneciam apenas idades mínimas

Os atuais equipamentos multicoletores que possibilitam a obtenção das razões $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ e $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, já permitem a obtenção de idades agrupadas com precisão de 0.3 a 3%, contra respectivamente 0.2% a 1.5% do SHRIMP, o que lhe confere uma performance próxima à do SHRIMP para rochas arqueanas. Portanto, são necessários maiores refinamentos dos procedimentos de calibração para ambas as técnicas caso a acurácia das idades U-Pb medidas necessitem ser melhores que 1.5% no SHRIMP ou que 3% no LA-ICP-MS.

Para obter-se uma datação U/Pb por laser *ablation*, cada análise perfura uma cavidade de 10 a 30 µm de diâmetro, consumindo cerca de 150 ng de zircão, ou seja ~ 50x mais material (zircão) por análise do necessário para obter uma análise com precisão similar no SHRIMP. Ou seja, a técnica é menos precisa e acurada. Além disso, ainda em comparação ao SHRIMP, as análises no LA ICP-MS têm desvios padrão maiores, sendo necessário um número maior de análises (individuais) para obter-se um erro similar ao do SHRIMP.

Em resumo, técnica LA-ICP-MS deve ser preferida para : i) apoio à cartografia em terrenos ou regiões totalmente desprovidas de análises geocronológicas prévias, ou com análises apenas pelos métodos Rb-Sr e K-Ar; ii) apoio à cartografia em terrenos policíclicos e/ou polifásicos, na impossibilidade de obtenção de análises SHRIMP; iv) apoio à cartografia em terrenos de qualquer natureza em projetos de orçamento restrito; iii) projetos de *follow up* de anomalias geofísicas e/ou geoquímicas, etc; iv) projetos de reconhecimento em áreas virgens, para pronta identificação de rochas magmáticas desprovidas de herança isotópica, possibilitando futuro detalhamento pela técnica TIMS. Cabe também ressaltar que a perspectiva de aplicação disseminada no país de técnicas micro-analíticas de alta resolução espacial e agilidade analítica como o LA-ICP-MS, representa um prospecto extremamente encorajador para diversos temas relacionados a datações de zircões detriticos como: estudos de proveniência; determinação de limites de idades em bacias sedimentares e metassedimentares (zircão, xenotima, monazita); idades de diagênese e deposição (Fig. II.18); idades de mineralizações singnéticas; análise de terrenos (datação dos picos metamórficos, magmáticos e de sedimentação, em sedimentos recentes (Estratigrafia "Fantasma").

II.2. 3 Considerações finais

A aplicação conjunta em larga escala das técnicas SHRIMP/LA-ICP-MS, TIMS deverá ser utilizada não apenas para o estabelecimento da cronoestratigrafia nas áreas cartografadas, mas deverão propiciar uma nova abordagem petrocronológica no mapeamento básico. A contextualização regional dos resultados no âmbito de cada terreno/orógeno deverá contribuir para delinear a escala de tempo interna, com o estabelecimento do *timing* dos eventos regionais de anatexia e colisão.

II.3 O método Pb-Pb Evaporação

O método Pb-Pb de evaporação re-definido por Kober (1986; 1987), baseia-se na ionização por evaporação da amostra, constituída por um cristal inteiro de zircão, em um espectrômetro de massa de ionização termal (*Thermal Ion Mass Spectrometre*) de filamento duplo. Essa técnica "alternativa" permite a determinação apenas das razões $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, impossibilitando a certificação do estado de concordância da análise, devido à impossibilidade de determinação da razão U/Pb, devendo seus resultados considerados apenas como idades mínimas. Porém, para compensar a impossibilidade de medida da razão U/Pb, no decorrer de uma análise completa diversas idades de evaporação $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ podem ser medidas em um grão individual, por meio de diversos patamares de aquecimento. Mesmo zircões de qualidade relativamente baixa podem ser datados pelo método, após um estágio preliminar de *outgassing*. No caso de todos os patamares fornecerem a mesma idade, o resultado teria uma equivalência razoável às idades obtidas pelas técnicas SHRIMP e ID-TIMS, embora com menor precisão. Relativamente à técnica SHRIMP, a precisão também é menor, em especial para amostras mais jovens que 1500 Ma, sendo a precisão nesses casos similar às obtidas no LA-ICP-MS. Outra limitação, importante do método, da mesma forma que na técnica TIMS, refere-se a zircões portadores de herança e/ou sobreposição metamórfica, quando os resultados podem representar uma mistura de idades sem significado geológico. Isso está relacionado à falta de resolução espacial analítica como conseqüência da evaporação total do grão, tornando o método inapropriado para datação cristais complexos.

Por outro lado, o método apresenta como principal vantagem, a capacidade de produzir resultados relativamente rápidos, comparativamente à técnica TIMS, implicando em custos mais baixos. No Brasil, o laboratório Pará-Iso (UFPA) tem empregado rotineiramente essa sistemática com excelentes resultados, em função de procedimentos criteriosos do laboratório, incluindo na presente década imageamento prévio para seleção de cristais homogêneos.

Portanto, o método deve ser preferencialmente solicitado para análise de rochas magmáticas mantélicas, cujos zircões são menos suscetíveis de portar herança, bem como para seus produtos de metamorfismo de baixo grau. Sempre, precedido por imageamento em MEV e quando possível, utilizado de forma integrada com a espectrometria de massa de alta resolução espacial (SHRIMP ou LA-ICP-MS).

II. 3 O Método Sm-Nd

O sistema Sm-Nd é de grande utilidade na averiguação de fontes e processos, mediante cálculo das razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e obtenção das idades modelo e o parâmetro epsilon Nd (ϵ_{Nd}) em decorrência do princípio básico de que o principal evento modificador da razão Sm-Nd em rocha total é o processo de diferenciação manto-crosta. Em outras palavras, as razões isotópicas de Nd e a razão Sm-Nd em rocha total, não variam significativamente em processos crustais como fusão parcial, metamorfismo, diagênese e alterações hidrotermais. Com isso, seria teoricamente possível datar-se qualquer rocha, assim como a época em que seu magma progenitor diferenciou-se do manto superior (protólito crustal), independentemente dos processos geológicos que tenha sofrido a *posteriori*. Entretanto é bom ter em mente que a sobrevivência desse sistema em eventos metamórficos de alto grau não deve ser assumida sem uma investigação detalhada devido à possibilidade de difusão iônica através dos limites intracristalinos, durante o metamorfismo.

Em cartografia regional os isótopos de Nd podem ser empregado para obtenção do tempo de residência crustal de rochas magmáticas e ortometamórficas ("idades" modelos), cujas idades de cristalização sejam conhecidas. É importante nunca perder de vista que "idades" modelo não são idades radiométricas absolutas, mas modelos. Ou, em outros termos, são baseadas na intersecção entre uma curva de crescimento de um radio-isótopo com a curva de evolução de reservatório geoquímico previamente escolhido, via de regra o manto terrestre depletado. Portanto, não se confundem e muito menos substituem, uma idade isocrônica, baseada no ajuste linear pela regressão dos mínimos quadrados de amostras (co-genéticas) múltiplas.

Em estudos mais detalhados, isótopos de Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) e Pb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) podem ser usados conjuntamente, na forma de diagramas de correlação com os de Nd, ou mesmo separadamente, para diversos fins petrológicos. Entretanto, como o sistema isotópico Rb/Sr pode ser mais facilmente reajustado em vários tipos de eventos (metamorfismo, hidrotermalismo, etc) quando comparado ao sistema Sm/Nd, esse deve ser a primeira opção analítica nos projetos de mapeamento.

2.3.1 Entendendo melhor as análises Sm-Nd

Para a obtenção de dados isocrônicos confiáveis é indispensável que as amostras sejam compatíveis com os princípios básicos dos sistemas isotópicos: i) tenham a mesma composição isotópica inicial à época da cristalização (co-genéticas); ii) tenham sido formadas ao mesmo tempo; iii) que o sistema tenha permanecido fechado à migração dos isótopos pais e filhos. Como regra geral pode considerar-se que razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ no intervalo 0.88 - 0.125 sejam representativas de um único estágio de evolução, entretanto outros fatores devem ser considerados.

Em primeiro lugar, há ainda que se distinguir "isócrona de rocha total" e "isócrona interna". A primeira, é obtidas através da análise de diversas amostras individuais e a isócrona interna, é obtida pela análise de uma amostra individual da rocha e a análise de

mineral separado da amostra. Como em uma rocha os minerais separados podem estar em contatos mútuos, no caso de isócronas internas metamórficas, os resultados devem ser vistos com cautela, devido à possibilidade de difusão iônica através dos limites intracristalinos, durante o metamorfismo. E, conseqüentemente, as idades devem ser interpretadas apenas como idades mínimas. Essas peculiaridades explicam o fato de que a maioria das tentativas de datação de eventos metamórficos resultam em errôcronas, com MSWD 10 a 20 x maiores que o valor máximo admitido para análises destituídas de misturas isotópicas.

2.3.2 Principais aplicações (e restrições) das idades modelos e do parâmetro ϵ_{Nd} em mapeamento regional

Idades modelos, juntamente com o parâmetro ϵ_{Nd} são ferramentas muito importantes do ponto de vista petrológico e geotectônico permitindo a distinção de protólitos mantélicos (ϵ_{Nd} positivo) de crustais (ϵ_{Nd} negativo) e por conseqüência, permitem uma discriminação entre ambientes tectônicos. Como conseqüência dessas possibilidades destaca-se também a importância desse parâmetro na elaboração de modelos preditivos de depósitos minerais. Em especial, para a discriminação entre arcos intraoceânicos com assinatura isotópica mantélica prístina, desprovidos de herança continental importante (ϵ_{Nd} positivo), dos arcos de margem continental ativa (cordilheiranos) e tipo himalayano (ϵ_{Nd} negativo). No Brasil, os primeiros (cordilheiranos) são especialmente importantes no Meso/Paleoproterozóico da Amazônia e no Toniano da Faixa Brasília. Já os arcos continentais predominam na evolução dos demais sistemas de orógenos brasileiros.

Uma aplicação importante para a cartografia regional é o emprego dos isótopos de Nd para a discriminação de terrenos com distinta história evolutiva amalgamados em eventos orogênicos superpostos, ou terrenos com evolução similar separados tectonicamente. Porém nesses casos é necessário sempre ter em conta que os estudos Sm-Nd devem ser sempre acompanhados da determinação da idade de cristalização das unidades-chaves, preferencialmente por meio de técnicas U-Pb. Além disso, esses estudos devem necessariamente serem baseados em mapas geológico em escala adequada, preferentemente 1: 50.000 região estando as unidades bem detalhadas do ponto de vista estrutural, petrológico e geoquímico. Por isso, especialmente na região amazônica, onde os conhecimentos cartográficos e estruturais são precários, as tentativas de discriminação dos vários terrenos/orógenos devem merecer atenção redobrada.

Outra aplicação importante do método se relaciona à determinação da idade de fonte de sedimentação, e conseqüentemente, das idades mínimas de abertura de bacias. Porém essa aplicação também tem limitações pois idades modelos para rochas sedimentares e metassedimentares (especialmente continentais) podem refletir misturas de fontes, fornecendo idades modelos médias de diversas fontes, não permitindo a estimativa precisa para a idade mínima de abertura das bacias.

Além desse enfoque, determinação de idades de cristalização através de regressão isocrônica – em rochas máficas não portadoras de zircão - é uma interessante aplicação alternativa. Entretanto, essa sistemática depende da obtenção de rochas com fracionamento suficientemente das razões Sm/Nd para permitir uma regressão consistente, peculiaridade dificilmente identificável em estudos regionais.

SUGESTÕES DE LEITURA COMPLEMENTAR SOBRE MÉTODOS E TÉCNICAS MAIS APLICADAS EM CARTOGRAFIA GEOLÓGICA

- Armstrong, R. L., 1991. A Brief History of Geochronometry and Radiogenic Isotopic Studies, Applications of Radiogenic Isotope Systems to Problems in Geology. In: L. Heaman & J.N. Ludden (Eds.) *Short course Handbook*. Mineralogical Association of Canada. V.19, Capítulo I, pp.1-27
- Bowring, S.A. e Williams, I.S., 1999. Priscoan (4.00-4.03) orthogneisses from northwest Canada. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 134, 3-16.
- Cocherie, A., Rossi, T.Ph., Fanning, C.M., Guerrot, C., 2005. Comparative use of TIMS and SHRIMP for U-Pb zircon dating of A-type granites and mafic tholeiitic layered complexes and dykes from the Corsican Batholith (France) *Lithos* (in press).
- Cocherie, A., Guerrot, C., Rossi, Ph., 1991. Single-zircon dating by step-wise Pb-evaporation: comparison with other geochronological techniques applied to the Hercynian granites of Corsica, France. *Chemical Geology* 101, 131– 141.
- De Paolo, D.J. 1988., *Neodymium Isotope Geochemistry*. Berlin, Springer-Verlag, 187p.
- Dickin, A.P. *Radiogenic Isotope geology*. Cambridge University Press, Cambridge, 452p.
- Gaudette, H.E.; Lafon, J.M.; Macambira, M.J.B.; Moura, C.A.V. & Scheller, T. 1998. Comparison of a single filament Pb evaporation/ionization zircon ages with conventional UPb results: examples from Precambrian of Brazil. *Journal of South America Earth Sciences*, 11: 351-363.
- Hanchar, J.M. and Miller, C.F., 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories. *Chemical Geology* 110, 1-13.
- Kober B. 1986. Whole grain evaporation for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age investigations on single zircons using a double filament source. *Cont. Min. Petrol.* 93, p.482-490.
- Kober B. 1987. Single grain evaporation combined with Pb+ emitter bedding for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ investigations using thermal ion mass spectrometry, and implications for zirconology. *Cont. Min. Petrol.* 96, p. 63-71.
- Machado, N., & Simonetti, 2001. U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon by Laser ablation-MC-ICO-MS In: Laser-Ablation ICPMS in the Earth Sciences/principles and applications (Paul Sylvester, Ed.) *Mineralogical Association of Canada, Short Course Series*, volume 29, Chapter 9. p. 121-146.
- Macambira, M.J.B. & Scheller, T. 1994. Estudo comparativo entre métodos geocronológicos aplicados em zircões: o caso do Granodiorito Rio Maria. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 4, Belém, 1994. *Boletim de Resumos Expandidos*, Belém/SBG. p.343-346.
- Shirey, S.B., 1991. The Rb-Sr, Sm-Nd and Re-Os isotopic systems: a summary and comparison of their applications to the cosmochronology and geochronology of igneous rocks. In: L.Heaman e J.N. Ludden, eds.) *Applications of Radiogenic Isotopic Systems to Problems In Geology. Short Course Handbook*, Mineralogical Association of Canada, v.19, Chapter 4, pp.102-166.
- Silva, L.C. da, 2005. Guia de procedimentos do SGB para amostragem, seleção de métodos e interpretação de dados geocronológicos UPb SHRIMP no mapeamento regional, através de estudos de casos brasileiros (*Em Preparação*).
- Williams, I.S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben, M.A., Shanks III, W.C., Ridley, W.I. (eds.). Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Reviews in Economic Geology*, Society of Economic Geology 7: 1.35.