

DIVISÃO DE GEODINÂMICA

INSTRUÇÃO TÉCNICA DIGEOD 01 – 01.07.2020

Procedimentos de geocronologia e análises isotópicas

1 – INTRODUÇÃO

Este guia visa fornecer orientações ao usuário que deseja realizar análises isotópicas como ferramenta para auxiliar no entendimento de processos geológicos. Nele são apresentados procedimentos de coleta e encaminhamento de amostras, linhas gerais para a seleção das metodologias a serem utilizadas, bem como formulários para planejamento e solicitação de análises. Mais detalhes relativos aos diferentes sistemas isotópicos e metodologias analíticas devem ser buscados na literatura.

Até o momento o Serviço Geológico do Brasil-CPRM não dispõe de equipamentos/laboratórios para análises de muitos métodos tratados aqui, assim, dependemos da contratação de laboratórios externos. A dependência da contratação implica que a lista de análises disponíveis pode variar ao longo do tempo. A Divisão de Geodinâmica (DIGEOD) é responsável pela gestão e apoio destas análises. Assim, para sua realização, cada projeto deve fazer a sua programação em conjunto com a DIGEOD, que poderá auxiliar na seleção da metodologia mais indicada para a solução do problema geológico, assim como informará os métodos analíticos disponíveis..

2 – COLETA E SELEÇÃO DE AMOSTRAS

2.1 – Informações gerais

O pesquisador em trabalho de campo deve ter em mente que a coleta adequada é fundamental para o sucesso de análises geocronológicas e isotópicas. A seleção das amostras deve ser realizada após a observação das relações estratigráficas em campo entre unidades e da definição dos problemas que precisam ser solucionados. Embora aparentemente simples, o procedimento de coleta, embalagem e rotulagem do material geológico durante as campanhas de campo é uma das etapas mais importantes para a obtenção de bons resultados analíticos, já que amostragens imprecisas e/ou episódios de contaminação podem, por exemplo, acarretar em desperdício de tempo e de recursos financeiros. Seleção de amostras, procedimento de coleta, preparação e encaminhamento adequados aumentam bastante a possibilidade de sucesso e a qualidade das análises, além de auxiliar os responsáveis pelos trabalhos laboratoriais na identificação de imprecisões nos resultados analíticos.

➤ Procedimentos básicos indicados durante as coletas de amostras são:

- Definição correta do litotipo para determinação da quantidade ideal de material a ser coletado e metodologias a serem aplicadas. O volume coletado de amostras varia de acordo com o tipo de rocha, e com o método a ser empregado, como detalhado a frente;
- Em afloramentos complexos e heterogêneos, a amostragem deve individualizar litotipos distintos. O geólogo deverá identificar no afloramento a presença de enclaves, xenólitos, autólitos, mobilizados graníticos, intrusões locais, bandas de diferentes composições, diques, veios, camadas com diferentes composições, seixos e matriz de conglomerados, etc. Cada litotipo amostrado deve representar um evento distinto;
- O afloramento é o melhor local para quebra e redução do tamanho dos fragmentos das amostras coletadas. As frações não devem ultrapassar 8 cm de diâmetro (aproximadamente o tamanho de um punho fechado) e, se maiores, devem ser reduzidos em locais livres de contaminação. O uso de serras, martelos ou prensas em laboratório pode ocasionar eventuais contaminações, em especial para análises isotópicas de Re-Os e Pb-Pb, portanto é o procedimento menos recomendado. Mesmo no campo deve-se tomar cuidado para não permitir o contato da amostra com materiais contaminantes presentes nos arredores do afloramento, como os que ocorrem em margens de drenagens ou encostas com deslizamento de solos;
- Após coleta e fragmentação (campo ou laboratório), a amostra deve ser imediatamente guardada em saco resistente de plástico, devidamente etiquetado, até a preparação para análises. Cuidados na identificação do material, como a utilização de mais de uma etiqueta (evitar a colagem de fitas

diretamente na amostra), são necessários para evitar casos de perda ou troca de amostras. A identificação das amostras coletadas é prevista na instrução técnica normativa relacionada ao tema.

2.2 – Volume de amostra

O volume de material a ser coletado varia em função do litotipo, do objetivo da amostragem e método analítico a ser empregado. Minerais como o zircão, comum em diversos tipos de rochas, podem ser encontrados já em pequenas quantidades de material processado, especialmente em rochas magmáticas félsicas, a exemplo de rochas granitoides e seus correspondentes metamórficos. Por outro lado, para rochas máficas é necessário o processamento de maior volume de material para que se obtenha alguns grãos, ou por vezes nenhum.

Além disto, durante a coleta deve-se prever que os procedimentos adotados pelos laboratórios da Rede LAMIN do SGB-CPRM demandam ainda certa quantidade de material para “contaminação” de britadores e moinhos antes da fragmentação da amostra, o qual é posteriormente descartado.

Os quantitativos indicados para coleta em campo de grupo/tipo de rocha se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 – Volumes sugeridos para amostras destinadas a análises isotópicas em rocha total e minerais. Modificada de Castro et al. (2012).

PREPARAÇÃO	ALVO	ROCHA	VOLUME
Separação de Minerais	Minerais traços para análise U-Pb*	Félsicas, sedimentares siltosas ou mais grossas (e seus correspondentes metamórficos)	10 fragmentos com ~ 8 cm de diâmetro (cerca de 7 Kg)
		Máficas e sedimentares argilosas (e seus correspondentes metamórficos)	20 fragmentos com ~ 8 cm de diâmetro (cerca de 12 Kg)
		Ultramáficas** (e seus correspondentes metamórficos)	Até 40 Kg
	Minerais essenciais*** (feldspato, anfibólio, granada, etc.)	Todos os tipos de rocha	4 fragmentos de rocha com ~ 8 cm cada
Pulverização	Rocha Total **** para análises Sm-Nd, Rb-Sr, Sr-Sr, Re-Os, etc.	Rochas de granulação fina	4 fragmentos de rocha com ~ 8 cm cada
		Rochas de granulação média, grossa, pegmatoide	Diversos fragmentos (~ 8 cm) que sejam equivalentes a 30 vezes o tamanho do maior grão encontrado na rocha

* Em geral zircão, mas pode variar em função da composição da rocha e dos minerais associados, tais como monazita, rutilo, titanita, perovskita e badeleita.

** Dado o alto risco de insucesso devido à raridade de minerais datáveis neste tipo de rocha, é aconselhável que a seleção de rochas ultramáficas para separação de zircão ou badeleita seja auxiliada pela avaliação de análises químicas, que deverão indicar aquelas com os maiores conteúdos de zircônio em sua composição.

*** Selecionados para análises Ar-Ar, isócronas minerais, isótopos estáveis, entre outros.

**** Para análises Rb-Sr e Sm-Nd é possível utilizar o mesmo material preparado para análises litogeoquímicas.

2.3 – Estado de conservação da amostra

O estado de conservação das rochas nos afloramentos também deve ser utilizado como critério de seleção de amostras, visto que uma mesma amostra pode ser analisada por vários métodos distintos (U-Pb, Sm-Nd, Ar-Ar, química mineral, entre outros). O clima de países tropicais, como o Brasil, dificulta a obtenção de amostras em condições ideais, porém a coleta de rochas frescas sempre deve ter prioridade sobre as intemperizadas.

Alguns sistemas isotópicos mais resistentes a ações intempéricas, como U-Pb e Lu-Hf em zircão, Sm-Nd em rocha total, permitem a realização de análises em amostras mais alteradas. Já as análises que utilizam minerais menos resistentes, ou métodos baseados em elementos com maior mobilidade, como K-Ar, Ar-Ar, Rb-Sr, exigem materiais sem alteração (exceto em estudos associados ao intemperismo).

Uma boa alternativa durante a coleta é a utilização de perfuratrizes manuais em afloramentos com litotipos variados e relações complexas entre estes. A profundidade de alcance da ferramenta e o pequeno diâmetro do furo permitem escolher a o local mais adequado de amostragem, acessando a porção mais fresca da rocha. Entretanto, dependendo da análise, é necessário o descarte da superfície que entrou em contato com a perfuratriz, devido ao potencial de contaminação.

2.4 – Casos especiais: Rochas bandadas e migmatizadas

Rochas bandadas e migmatizadas exigem atenção especial durante os procedimentos de coleta devido à complexidade da história geológica, em geral polifásica. Para que os resultados das análises sejam fidedignos e retratem o evento geológico de interesse, recomenda-se a amostragem de porções que representem individualmente cada evento. É fundamental também que o encaminhamento das amostras para análise seja acompanhado de informações geológicas detalhadas (por exemplo, a descrição do paleossoma e do neossoma de um migmatito). Para mais detalhes, consultar a publicação “Geocronologia aplicada ao mapeamento regional”, de Silva (2006).

Todos os procedimentos descritos anteriormente também se encontram detalhados em Castro et al. (2012). Algumas modificações com relação ao volume de coleta, métodos e procedimentos estão descritas neste guia de procedimentos técnicos.

3 – SELEÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO

Ao realizar a coleta dos litotipos presentes nos afloramentos, é preciso ter a definição dos problemas geológicos a serem solucionados. A sequência ideal, anterior às solicitações analíticas, engloba a descrição petrográfica e, se possível, a análise litoquímica da rocha. A partir deste entendimento, podem ser determinados os métodos geocronológicos, químicos e isotópicos a serem aplicados. Um mesmo afloramento pode ser abordado com métodos diversos e a escolha depende tanto dos resultados esperados, quanto dos materiais e minerais obtidos após os processos de preparação.

Como as análises são bastante dispendiosas e, por vezes, em número limitado, é importante uma avaliação criteriosa do método mais adequado para cada situação, com a definição precisa dos litotipos, evitando-se assim a obtenção de resultados inadequados.

Para facilitar na escolha do método em situações diversas, mostrando a sua interação com outras metodologias disponíveis, foram definidos os programas analíticos Regular e Especial. O Programa Regular inclui determinações de idades U-Pb (via *Laser Ablation – Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry / LA-ICP-MS* ou *Secondary Ion Mass Spectrometry / SIMS*, esta última também conhecida como microsonda iônica), estudos com isótopos de Sm-Nd e Lu-Hf, além do uso de química mineral em Microsonda Eletrônica e Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV.

O Programa Especial é destinado a investigações mais específicas, como estudos de mineralizações e problemas geológicos complexos. Neste programa poderão ser utilizados todos os métodos disponíveis para o Programa Regular, acrescidos de outros métodos, como determinações de composições de isótopos estáveis (C-O-S-B), termocronologia Ar-Ar e química mineral de elementos traços e ultratraços determinados por LA-ICP-MS.

A Tabela 2 resume os principais sistemas isotópicos e métodos analíticos existentes, com aplicações para determinadas questões geológicas abordadas em itens subsequentes, cuja disponibilidade anual depende da capacidade analítica dos laboratórios contratados, demandas e orçamento disponível.

Tabela 2 – Listagem dos métodos isotópicos mais comuns, tipos de rochas, materiais utilizados e informações obtidas. Modificada de Castro et al. (2012).

MÉTODO	TIPO DE ROCHA	MATERIAL	INFORMAÇÃO OBTIDA	OBSERVAÇÕES
U-Pb (Diluição isotópica)	Magmáticas (félsicas e máficas), metamórficas e sedimentares	Zircão, monazita, rutilo, titanita, perovskita, badeleíta, xenotima, e outros minerais ricos em U e pobres em Pb	CM, META, MIG, MIN	Indicado para minerais homogêneos, já que todo o grão é utilizado para uma única leitura. Analiticamente é o método mais preciso, mas não necessariamente o mais acurado.
U-Pb (<i>in situ</i> , via LA-ICP-MS ou SIMS)	Magmáticas (félsicas e máficas), metamórficas e sedimentares	Zircão, monazita, rutilo, titanita, perovskita, badeleíta, xenotima, carbonato, e outros minerais ricos em U e pobres em Pb	CM, META, MIG, MIN, FO, SED, DIA	Indicado para todos os tipos de rochas, inclusive as polideformadas. Análise pontual, tamanho do <i>spot</i> (mínimo de cerca de 25µm) pode ser restritivo. Recomenda-se LA-ICPMS para estudos de proveniência.
Sm-Nd	Magmáticas (félsicas e máficas), metamórficas e sedimentares	Rocha total, granada, feldspato, piroxênio, apatita, scheelita, cassiterita, fluorita	CM, META, MIG, DM, FO	Idade modelo indica a idade da derivação mantélica do magma fonte, enquanto o ϵ_{Nd} fornece informações petrogenéticas. A T_{DM} de sedimentos indica a média ponderada de suas fontes. Idade isocrônica pode ser obtida em minerais ou rocha total. Possível análises <i>in situ</i> via LA-ICPMS.
Pb-Pb	Magmáticas (félsicas e máficas), metamórficas e sedimentares	Rocha total, feldspato, galena e outros minerais ricos em Pb	SED, FO, MIN, AMB	À exceção do método isocrônico, as análises Pb-Pb têm maior aplicação em estudos petrogenéticos e caracterização de fontes e terrenos. Composição isotópica de minerais pode ser determinada <i>in situ</i> via LA-ICP-MS.
Re-Os	Magmáticas (máficas), sedimentares (ricas em matéria orgânica) e mineralizações	Rocha total, sulfetos (em especial molibdenita) e óxidos	CM, MIN, SED, FO	Informações de T_{DM} similares ao método Sm-Nd. Análise de sulfetos permite datar mineralizações. Isócrona em rocha total de sedimentos ricos em matéria orgânica permite datar sedimentação. Composição isotópica de minerais pode ser determinada <i>in situ</i> via LA-ICP-MS e SIMS.
Lu-Hf	Magmáticas (félsicas e máficas*), metamórficas e sedimentares	Zircão	DM	Idade modelo indica a idade da derivação mantélica da fonte do zircão (ou média ponderada, no caso de mistura de fontes).
K-Ar e Ar-Ar	Rochas e minerais ricos em potássio	Micas, anfibólios, alanita, feldspatos, glauconita, rocha total (vulcânicas), lateritas e argilas	CM, META, MIG, MIN, RESF, SOER, LAT	A temperatura de fechamento dos diferentes minerais e suas relações com a rocha determinará o significado da idade obtida. A análise pode ser efetuada por aquecimento gradual ou fusão total por <i>laser</i> ou forno resistivo.
Rb-Sr	Magmáticas (félsicas), metamórficas* e sedimentares	Rocha total, feldspato potássico, apatita e carbonatos	CM, META, MIG, MIN, SED, FO, AMB	Razões $^{87}Sr/^{86}Sr$ são utilizados na determinação de idade de deposição de carbonatos. As razões iniciais $^{87}Sr/^{86}Sr$ fornecem informações petrogenéticas sobre a fonte do magma. Composição isotópica de minerais pode ser determinada <i>in situ</i> via LA-ICPMS.
Traço de Fissão	Magmáticas, metamórficas e sedimentares	Apatita, epidoto, titanita, zircão, granada, vidro vulcânico	RESF, SOER	Aplicada em estudos de história térmica de terrenos em eventos de soerguimento e resfriamento.

CM-Cristalização Magmática, DM-Derivação Mantélica, DIA – Diagênese, AMB-Ambiente, FO-Fonte, LAT-Laterização, META-Metamorfismo, MIG-Migmatização, MIN-Mineralização, RESF-Resfriamento, SED-sedimentação, SOER-Soerguimento. * Uso em casos específicos.

Tabela 2 – Listagem dos métodos isotópicos mais comuns, tipos de rochas, materiais utilizados e informações obtidas. Modificada de Castro et al. (2012). (continuação)

MÉTODO	TIPO DE ROCHA	MATERIAL	INFORMAÇÃO OBTIDA	OBSERVAÇÕES
S	Magmáticas (félsicas e máficas), metamórficas, sedimentares e mineralizações	Sulfetos e sulfatos	AMB, FO	Isótopos estáveis de enxofre fornecem informações a respeito das fontes de sulfetos e sulfatos. Composição isotópica de minerais pode ser determinada <i>in situ</i> via LA-ICP-MS e SIMS.
B	Magmáticas (félsicas e máficas), metamórficas, sedimentares e mineralizações	Turmalina	AMB, FO	Isótopos estáveis de boro em turmalina são utilizados para auxiliar na caracterização da natureza, evolução e possíveis fontes dos componentes de fluidos mineralizadores. Composição isotópica de minerais pode ser determinada <i>in situ</i> via LA-ICP-MS.
O	Silicáticas	Silicatos como quartzo, feldspatos, rutilo, zircão, entre outros.	AMB, FO, TER	Pode ser utilizado como auxiliar no estudo de processos petrológicos, incluindo diferenciação magmática, metamorfismo, bem como processos crustais que envolvem relações entre fluidos e rocha. A determinação se dá <i>in situ</i> .
C-O	Carbonatos	Rocha total, fósseis, água, etc	AMB, FO	Composição isotópica de C-O é utilizada em estudos paleoambientais, determinação de fontes de fluidos. Determinação do $\delta^{13}\text{C}$ pode indicar a origem do carbono gráfico (crustal/mantélico).

CM-Cristalização Magmática, DM-Derivação Mantélica, DIA – Diagênese, AMB-Ambiente, FO-Fonte, LAT-Laterização, META-Metamorfismo, MIG-Migmatização, MIN-Mineralização, RESF-Resfriamento, SED-sedimentação, SOER-Soerguimento, TER-Termometria.
* Uso em casos específicos.

3.1 – Idades U-Pb e isótopos de Hf em zircão de rochas ígneas

Idades de cristalização de rochas ígneas e suas fontes são essenciais para decifrar a história magmática e de crescimento crustal de qualquer terreno. Cristais de zircão são datados *in situ* via LA-ICP-MS ou SIMS, e esta última, devido à maior precisão e acurácia analítica, deverá ser, preferencialmente, direcionada para amostras geológicas em contextos mais complexos. O zircão analisado pelo método U-Pb poderá ser posteriormente utilizado para a determinação dos isótopos de Hf, visando complementar a investigação acerca das fontes dos magmas geradores deste mineral.

3.2 – Idades U-Pb e isótopos de Hf em zircão de rochas sedimentares

O material sedimentar proveniente da erosão da crosta continental fornece informações valiosas acerca dos processos de crescimento crustal, cujo registro original já fora erodido. A relação com as áreas fontes e idade de deposição de sequências siliciclásticas está intrinsicamente associada ao ambiente tectônico vigente no momento da sedimentação. Estudos de minerais pesados, geoquímica de rocha total e outros minerais detríticos fornecem importantes informações, porém sem alusão à idade dos componentes das áreas fontes. Por exemplo, sequências formadas em ambientes de arco magmático e colisão continental diferem significativamente em termos de suas assinaturas nos cristais de zircão detríticos, daquelas formadas em ambientes intracontinentais.

A análise de zircão extraído de rochas (meta) sedimentares pelo método U-Pb via LA-ICP-MS possibilita não só a caracterização da(s) área(s) fonte(s) de uma determinada unidade, mas também a definição da idade máxima de deposição da mesma. Estudos isotópicos combinados pelas técnicas U-Pb e Lu-Hf em zircão detrítico permitem a distinção entre grãos que têm a mesma idade de cristalização, mas foram formados em domínios crustais com idades de extração mantélica distintas. Esses estudos podem ser realizados usando-se as idades de residência crustal determinadas em grãos individuais. Estudos desse tipo são desenvolvidos com o auxílio da sistemática Sm-Nd em rocha total, contudo, problemas relacionados com a obtenção de idades mistas são muitas vezes interpretados sem o devido cuidado, levando a conclusões errôneas. Métodos como idades K-Ar em micas detríticas e U-Pb são corriqueiramente empregados em estudos de fontes sedimentares. Porém, o sistema K-Ar é facilmente

desestabilizado durante o metamorfismo e os espectros de idades U-Pb em zircão podem gerar padrões similares em terrenos com diferentes histórias crustais.

3.3 – Assinatura isotópica Nd-Sr-Pb de rochas ígneas

Os isótopos de Nd-Sr-Pb podem ser utilizados em rochas ígneas, e seus correspondente metamórficos, com o objetivo de complementar os estudos de petrogênese (fontes), sempre acompanhados de caracterização geoquímica robusta e geocronologia.

3.4 – Idade e assinatura isotópica de rochas máficas e ultramáficas

De maneira geral, o zircão encontra-se presente em rochas saturadas em SiO₂, limitando o uso desse mineral para obtenção de idades pelo sistema U-Pb. Alternativamente, para rochas máficas de baixo grau metamórfico, o mineral badeleíta pode ser utilizado para a obtenção de idades pelo método U-Pb. Assim como no zircão, as datações podem ser realizadas por diluição isotópica (do termo em Inglês, ID-TIMS) ou por técnicas *in situ* (LA-ICP-MS ou SIMS). Na ausência de zircão ou badeleíta, a obtenção de idades em rochas máficas pode ser realizada por meio de isócronas utilizando-se o sistema isotópico Sm-Nd. Neste último caso, as análises são realizadas por ID-TIMS e é necessária a coleta de amostras que representem termos geoquimicamente cogenéticos e contemporâneos, porém com certa diferenciação (p.ex. termos mais primitivos e termos mais evoluídos), visando obter maior espalhamento dos dados e melhor alinhamento da isócrona, o que resulta na maior acurácia da idade.

À parte do interesse por idades de cristalização, basaltos primitivos são os melhores veículos que carregam a assinatura dos reservatórios mantélicos do qual derivam. Assim, estudos isotópicos por ID-TIMS pela combinação dos sistemas Sm-Nd, Sr-Sr e Pb-Pb permitem traçar os reservatórios geoquímicos e, conseqüentemente, os ambientes tectônicos possíveis para a geração dessas rochas primitivas.

3.5 – Idades e assinaturas isotópicas de sistemas mineralizantes

Para a obtenção de idades de mineralizações é necessário abordar o problema por meio de diversos métodos e técnicas. Múltiplos eventos de retrabalhamento termal podem deturpar alguns sistemas geocronológicos, que eventualmente geram idades incorretas dos diferentes estágios de mineralização.

Minerais que contenham urânio (zircão, monazita, badeleíta ou allanita) e fazem parte da paragênese de alteração hidrotermal são os melhores alvos para obtenção de idades robustas (U-Pb via LA-ICP-MS ou SIMS). As análises dos minerais poderão ser realizadas em lâminas polidas ou em concentrados minerais. Para a identificação de minerais de interesse é conveniente o uso do MEV para sua localização em lâminas delgadas polidas. Alternativamente, ou em conjunto com a datação de minerais que perfazem a paragênese de alteração, pode ser realizada a datação isocrônica em sulfetos pelo método Re-Os.

A utilização de métodos termocronológicos de mais baixa temperatura pode ajudar a obter idades da mineralização, contudo, eventos termais superpostos podem gerar idades de reaquecimento, ou mesmo indicar a introdução de fluidos estéreis finais dissociados do evento mineralizador principal. Para entender como a dissipação do calor afeta uma determinada mineralização durante a evolução geológica, deve ser utilizada a datação direta em minerais da paragênese de alteração (anfíbios, micas e feldspatos) com diferentes temperaturas de bloqueio isotópico pelo método Ar-Ar.

3.6– Idades de eventos deformacionais e metamorfismo

O estabelecimento de idades e eventos superpostos é fundamental para entender o contexto tectônico de terrenos deformados. A datação direta da deformação em zonas de cisalhamento na fácies xisto-verde e anfíbolito são de particular interesse, pois estas estruturas podem não somente acomodar a deformação, mas também servir de condutos para fluidos mineralizantes. Avanços significativos estão sendo realizados nesse campo, a partir da identificação e microanálise isotópica de minerais que pertençam à paragênese metamórfica relacionada ao evento de deformação.

Alguns minerais acessórios que contêm urânio (p.ex. zircão, alanita, monazita e titanita) podem registrar informações a respeito de estágios específicos da deformação, tais como idades e condições físico-químicas (p.ex. pressão, temperatura e fluidos), além de serem resistentes a eventos retrometamórficos e alterações de baixa temperatura. Estes dados, em conjunto com as observações petrográficas e petrológicas, podem fornecer informações importantes para o entendimento dos processos aos quais a rocha foi submetida. Embora seja uma

metodologia mais trabalhosa e não seja utilizada rotineiramente, as análises isotópicas *in situ* em lâmina polida para petrocronologia podem ser uma boa alternativa para casos complexos, visto que é possível ter o controle das relações microtexturais. Para que os resultados obtidos de fato respondam questões geológicas, é necessário o mapeamento das zonas de cisalhamento de interesse, a investigação petrográfica (por microscópico convencional e MEV) das fases minerais a serem datadas e suas relações texturais, a fim do entendimento da vinculação destes minerais com episódios metamórficos e deformacionais.

3.7 – Termocronologia Ar-Ar: idades de resfriamento/reaquecimento

A identificação de fontes de calor é fundamental para o entendimento da circulação de fluidos hidrotermais. Da mesma forma, entender como e quando um determinado bloco crustal ou distrito mineral atingiu temperaturas de equilíbrio, em escala regional ou de depósito, é necessário para uma melhor contextualização da evolução termal e eventos mineralizantes. Até que ponto reaquecimentos podem remobilizar mineralizações mais antigas, com injeção ou não de novas fases fluidas, são perguntas pertinentes dentro da investigação.

Os blocos cratônicos brasileiros são rodeados por faixas orogênicas mais jovens e, portanto, determinar o alcance do evento termal e da deformação relacionados a esses orógenos jovens para o interior dos crátons é objeto de estudo no campo da geodinâmica.

A investigação da abrangência desses eventos e sua relação com as mineralizações através da termocronologia Ar-Ar em minerais com diferentes temperaturas de bloqueio isotópico (anfíbios, micas e feldspatos) pode fornecer informações sobre quando e sob que taxa ocorreu o resfriamento das porções cratônicas.

3.8 – Isótopos estáveis em minerais e rocha total

A origem dos fluidos mineralizantes e seus reservatórios, bem como a migração e final deposição de seus solutos na crosta, são essenciais para a vetorização de trabalhos exploratórios. A assinatura de fluidos hidrotermais associados a mineralizações pode ser diagnosticada por meio da assinatura de isótopos estáveis (O, C, S e B) da paragênese mineral de alteração. Os métodos analíticos para a determinação da composição destes isótopos podem variar bastante. Isótopos de O em silicatos, S (sulfetos e sulfatos) e B (turmalina) podem ser determinados *in situ* em lâminas ou montagens de minerais, por exemplo. Já as determinações de C-O (em carbonatos) e S podem ser realizadas por dissolução de concentrados minerais. Para o caso de rochas carbonáticas são realizadas análises de rocha total. O mapeamento preditivo de zonas de cisalhamento e de outros condutos para fluidos mineralizadores pode ser realizado por meio da comparação das assinaturas isotópicas de depósitos maduros com a de minerais de alteração observados nas áreas de interesse e que possam indicar a presença de mineralizações aflorantes ou em subsuperfície. Esse tipo de abordagem é favorecida pelo baixo custo das análises.

4 – SOLICITAÇÃO DE ANÁLISES

4.1 – Fluxo operacional

A solicitação analítica em amostras coletadas em projetos do SGB-CPRM deve seguir o fluxo operacional estabelecido pela DIGEOD, apresentado na Figura 1. O primeiro passo é a formulação da Proposta de Planejamento Analítico-PPA (Anexo 1), que consiste na identificação dos problemas geológicos a serem estudados e das ferramentas utilizadas para a obtenção de respostas, que deve levar em conta estudos anteriores realizados na área. No PPA já deve haver uma previsão do número de amostras a serem analisadas no projeto e métodos a serem empregados. O envio deste formulário para análise pela DIGEOD deve ocorrer no início dos projetos, durante o primeiro ano de execução. O PPA deve ser proposto pelo coordenador do projeto e enviado para DIGEOD pelos gerentes regionais, após avaliação e concordância. A DIGEOD fará a avaliação e discussão da proposta em conjunto com a equipe, quando serão acordados os métodos e quantitativos a serem executados, levando-se em conta a metodologia mais adequada, a relevância do problema geológico e a disponibilidade analítica.

É possível que, durante a execução do projeto, o planejamento precise ser revisto em função do surgimento de novos dados ou problemas. Neste caso, um novo PPA precisa ser apresentado à DIGEOD, para que a programação seja ajustada.

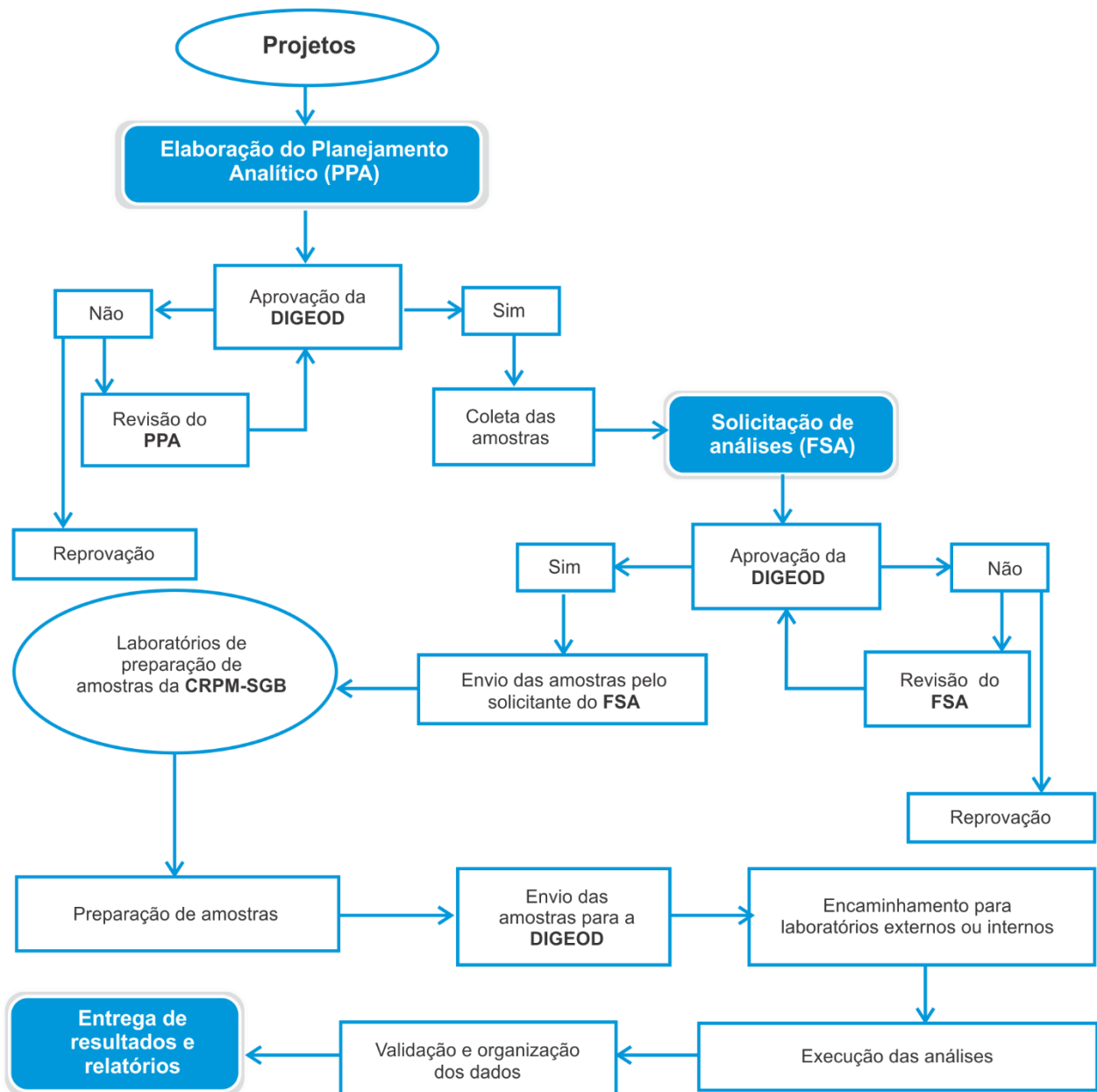


Figura 1 – Fluxo operacional idealizado para a realização de análises na DIGEOD.

O segundo passo ocorre após a coleta das amostras em campo, ou a recuperação de amostras úteis nos arquivos da Litoteca, com o preenchimento do Formulário de Solicitação Analítica - FSA (Anexo 2), sendo necessário o preenchimento de um formulário por cada amostra a ser analisada, devendo ser informadas as características principais da amostra, com ilustrações, objetivos da solicitação, método(s) e resultado(s) esperado(s).

Nos casos de solicitação de análises para mais de um litotipo do mesmo afloramento (cujas amostras são identificadas por A, B, C, etc, conforme guia normativo referente à identificação de amostras) pode ser considerado um único formulário FSA. Tanto o formulário do planejamento (PPA) quanto o de solicitação de análise (FSA) serão fornecidos pela DIGEOD em planilha eletrônica.

O ideal é que as amostras sejam preparadas nos laboratórios da Rede LAMIN do SGB-CPRM, após a análise e aprovação do FSA, evitando-se assim desperdício de tempo e recursos. A amostra preparada deve ser enviada para a DIGEOD e esta dará os encaminhamentos necessários, que inclui a catação manual dos grãos de interesse, montagem em resina e imageamento no MEV. Os métodos baseados em determinações em rocha total dispensam esta etapa, e as amostras deverão ser enviadas à DIGEOD já devidamente pulverizadas.

As amostras serão então analisadas, dentro do possível, em ordem de priorização estabelecida pelo projeto (ex. considerando a importância geológica das amostras) e pelo Departamento (eg., relevância e prazo de término dos projetos) ao qual o projeto está relacionado. À DIGEOD caberá garantir a qualidade analítica dos resultados, entregar os dados organizados e preliminarmente interpretados.

5 – REFERÊNCIAS

CASTRO, J. H. W. et al. **Guia para coleta e preparação de amostras para análises isotópicas**. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. 47 p. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Laboratorios-de-Analises-Minerais---Rede-LAMIN/Produtos-e-Servicos/Analise-de-Material-Geologico-3502.html>. Acesso em: jun. 2020.

SILVA, L. C. **Geocronologia aplicada ao mapeamento regional, com ênfase na técnica U-Pb SHRIMP e ilustrada com estudos de casos brasileiros**. Brasília: CPRM, 2006. 132 p. (Publicações Especiais do Serviço Geológico do Brasil, 1). Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/livro_13_11.pdf. Acesso em: jun. 2020.

AUTORES

Joseneusa Brilhante Rodrigues
Lynthener Bianca Takenaka de Oliveira
Raíssa Belotti de Mesquita
Vidyã Vieira de Almeida

Anexo 1- Formulários para Proposta de Planejamento Analítico (PPA) para Isótopos e Química Mineral



Serviço Geológico do Brasil - CPRM



DIGEOD - Divisão de Geodinâmica

PROPOSTA DE PLANEJAMENTO ANALÍTICO - ANÁLISES ISOTÓPICAS

UNIDADE:		DATA:	
PROJETO:		CHEFE:	

DETERMINAÇÃO DE IDADE

UNIDADE ALVO	PROBLEMA GEOLÓGICO A SER INVESTIGADO	MÉTODO	QUANT. AMOSTRAS	OBJETIVO DA ANÁLISE E BENEFÍCIOS DE SUA REALIZAÇÃO

ASSINATURA ISOTÓPICA

UNIDADE ALVO	PROBLEMA GEOLÓGICO A SER INVESTIGADO	MÉTODO	QUANT. AMOSTRAS	OBJETIVO DA ANÁLISE E BENEFÍCIOS DE SUA REALIZAÇÃO



Serviço Geológico do Brasil - CPRM



DIGEOD - Divisão de Geodinâmica

PROPOSTA DE PLANEJAMENTO ANALÍTICO - QUÍMICA MINERAL e IMAGENS

UNIDADE:		DATA:	
PROJETO:		CHEFE:	

DISCRIMINAÇÃO DAS ANÁLISES PLANEJADAS

UNIDADE ALVO	PROBLEMA GEOLÓGICO A SER INVESTIGADO	TIPO DE AMOSTRA	TIPO DE ANÁLISE	QUANT. AMOSTRAS	OBJETIVO DA ANÁLISE E BENEFÍCIOS DE SUA REALIZAÇÃO

SIGLAS UTILIZADAS: MEV- Microscópio Eletrônico de Varredura, BSE - Imagem de elétrons retroespalhados; CL - Imagem de catodoluminescência; EBSD - Difração de elétrons retroespalhados; EDS - Espectrometria de energia dispersiva; SE - Imagem de elétrons secundários, LA-ICPMS - Espectrometria de massa com fonte de plasma acoplado a sistema de ablação a laser.

Anexo 2 - Formulários de Solicitação de Análises (FSA)



Serviço Geológico do Brasil - CPRM

DIGEOD - Divisão de Geodinâmica



FORMULÁRIO DE SOLICITAÇÃO DE ANÁLISES

AMOSTRA:	UNIDADE ESTRATIGRÁFICA:
----------	-------------------------

DATAÇÃO					
SUBTIPOS (A, B, C, etc)	Rocha	Método	Material	Idade Esperada	Finalidade

ASSINATURA ISOTÓPICA					
SUBTIPOS (A, B, C, etc)	Rocha	Método	Material	Finalidade	

MICROSSONDA ELETRÔNICA*					
SUBTIPOS (A, B, C, etc)	Rocha	Material	Minerais de Interesse <i>(listar elementos de interesse, se for o caso)</i>	Finalidade <i>(Além do objetivo, especificar se análise pontual, linha ou mapa)</i>	

MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA*					
SUBTIPOS (A, B, C, etc)	Rocha	Método	Material	Alvo <i>(Minerais e/ou estruturas)</i>	Finalidade <i>(Além do objetivo, no caso de EDS, especificar se análise pontual, linha ou mapa)</i>

BSE - Imagem de elétrons retroespalhados; CL - Imagem de catodoluminescência; EBSD - Difração de elétrons retroespalhados; EDS - Espectrometria de energia dispersiva; SE - Imagem de elétrons secundários

* As análises só serão realizadas após o encaminhamento do mapa da amostra com as marcações dos locais a serem analisados e descrição clara do objetivo, conforme modelo disponibilizado pela DIGEOD