Caracterização e geocronologia SHRIMP U-Pb em zircão das rochas subvulcânicas do sistema pórfiro Yarumalito, Distrito de Marmato, Colômbia

Isadora A. HENRICH¹, José Carlos FRANTZ¹, Juliana C. MARQUES¹, Oswaldo ORDOÑEZ-CARMONA², Marco S. CASTOLDI³ & Kei SATO⁴

1. Programa de Pós Graduação em Geociências, Laboratório de Geologia Isotópica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: isahenrichs@gmail.com, jose.frantz@ufrgs.br, juliana.marques@ufrgs.br.

2. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín). AA 1027, Medellín, Colômbia. E-mail: oswaldo.geologo@gmail.com.

3. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves 9500, 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil. marco.castoldi@hotmail.com.

4. Centro de Pesquisas Geocronológicas, Universidade de São Paulo. Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: keisato@usp.br.

Recebido em 11/2013. Aceito para publicação em 11/2014.

Versão online publicada em 04/12/2014 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - O Distrito Mineiro de Marmato, localizado na Cordilheira Central Andina, é considerado um dos mais antigos da Colômbia e as atividades de extração de ouro remontam à época dos Incas, tendo sido explorado de forma intermitente há mais de mil anos. Inserido neste contexto encontra-se o sistema pórfiro Yarumalito (SPY), caracterizado por concentrar minério em veios controlados por estruturas e *stockworks*. O sistema ígneo é relacionado ao magmatismo mioceno da Formação Combia. Neste trabalho foram descritas as rochas subvulcânicas diretamente relacionadas às zonas mineralizadas do SPY com o objetivo de caracterizar as intrusões e realizar datação através do método U-Pb em zircão. Amostras selecionadas de duas intrusões férteis, uma andesítica (mais abundante na área) e outra diorítica (de ocorrência mais restrita) com características intrusivas na primeira, foram criteriosamente descritas e datadas por SHRIMP na Universidade de São Paulo. Os resultados apontaram para um intervalo bastante restrito para as idades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, com médias ponderadas variando de $7,00 \pm 0,15$ Ma para o andesito pórfiro a $6,95 \pm 0,16$ Ma para o diorito pórfiro. Estes resultados posicionam o sistema Yarumalito nas fases finais do magmatismo Combia e sugerem um intervalo de tempo restrito para a cristalização das intrusivas portadoras de mineralizações no Yarumalito e do Distrito de Marmato.

Palavras-chave: Combia, Yarumalito, SHRIMP, Pórfiro, Mioceno, Distrito Mineiro de Marmato.

Abstract - CHARACTERIZATION AND ZIRCON SHRIMP U-Pb GEOCHRONOLOGY OF THE SUBVOLCANIC ROCKS FROM YARUMALITO PORPHYRY SYSTEM, MARMATO DISTRICT, COLOMBIA. The mining District of Marmato, located in the Central Cordillera, is considered one of the oldest gold districts in Colombia and its exploration dates back to the Inca's times, being exploited regularly for more than a thousand years. Inserted in this context lies the Yarumalito porphyry system (YPS), characterized to concentrate ore in structure related veins and stockworks. The YPS is related to the Miocene magmatism of the Combia Formation. In this paper, the subvolcanic rocks directly associated with the mineralized zones were described in order to obtain U-Pb ages in zircon to the intrusions. Selected samples from two fertile intrusions, one andesitic (more abundant in the area) and other dioritic (more restricted), were carefully described and dated by SHRIMP. The results points to a very restricted interval for the ages, with weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ varying from $7,00 \pm 0,15$ Ma for the andesitic porphyry and 6.95 ± 0.16 Ma for the dioritic porphyry. These results constrain the Yarumalito system to the final stages of the Combia magmatism and suggest a brief period for the crystallization of the mineralized subvolcanic rocks in the area and in the Marmato District.

Keywords: Combia, Yarumalito, Porphyry, Miocene, Marmato Mining District

1 Introdução

O Projeto Yarumalito, propriedade da empresa *Colombian Mines Corporation*, está inserido no distrito mineiro de Marmato, nos Departamentos de Antioquia e Caldas, Colômbia. O distrito mineiro de Marmato é uma região com vasto histórico de exploração aurífera, que antecede a colonização espanhola da área.

Apesar da área de Marmato ser explorada desde o

tempo dos Incas, o conhecimento geológico e geocronológico sobre a região ainda é restrito. O sistema Yarumalito tem característica de depósito do tipo pórfiro e a mineralização de ouro ocorre principalmente em veios controlados por estruturas e *stockworks* relacionados às rochas subvulcânicas da Formação Combia, de idade miocena entre 12 e 6 Ma. O magmatismo Combia é de caráter cálcio-alcalino de alto potássio e inclui as intrusões pórfiras mineralizadas a ouro conhecidas da Colômbia.

Dados obtidos a partir de testemunhos de sondagem realizados pela empresa *Colombian Mines Corporation* indicam altos teores de ouro e demonstram o grande potencial da área de Yarumalito. Neste trabalho, são descritos em detalhe furos de sondagem representativos da área com o objetivo de caracterizar as rochas subvulcânicas envolvidas na mineralização e apresentadas datações U-Pb em zircão de duas intrusões do sistema pórfiro Yarumalito que permitem delimitar a época relacionada à deposição de ouro.

2. Área, materiais e métodos

O projeto Yarumalito compreende uma área total de 14,25km² e está localizado a 109 km ao sul da cidade de Medellín, pela rodovia Pan-Americana, 11 km a norte da cidade de Marmato, 3,4 km norte da cidade de Caramanta e 4,3 km da cidade de Valparaíso, no Departamento de Antioquia, Colômbia.

2.1 Geologia regional

Os Andes Colombianos são divididos em Cordilheiras Central, Ocidental e Oriental (Fig. 1) separadas pelos vales de Cauca-Patía e Magdalena (Villagómez *et al.*, 2011). O sistema pórfiro Yarumalito está localizado no Distrito Mineiro de Marmato, na parte ocidental da Cordilheira Central, no vale de Cauca-Patía, denominado por Sillitoe (2008) “*Middle Cauca Belt*”. O vale de Cauca-Patía é delimitado pelas falhas de Cauca e Romeral. O sistema de falhas Cauca-Romeral é uma sutura colisional, orientada de norte a sul, do Equador até a costa caribenha colombiana (Tassinari *et al.*, 2008). Esta zona de sutura foi submetida a transpressão destal durante o Mioceno (Rossetti & Colombo, 1999), com idade sugerida de $5,6 \pm 0,4$ Ma por Vinasco (2001), obtida por Ar-Ar em biotita de anfibolito deformado. Sistemas de falhas de empurrão observados em perfis sísmicos truncam os corpos subvulcânicos intrusivos,

Figura 1. Localização da área de estudo. A) Mapa litotectônico dos Andes colombianos, com localização dos Distritos Mineiros de Marmato e La Colosa, e do sistema pórfiro Yarumalito; B) Posição geográfica do sistema pórfiro Yarumalito, e do perfil P-P' em relação às divisões das Cordilheiras colombianas (modificado de Cediel *et al.* 2003).

sugerindo uma reativação pós-Miocênica do sistema de falhas Cauca-Romeral (Cediel *et al.*, 2003).

A Cordilheira Central Colombiana é composta por diversos terrenos tectono-estratigráficos que ainda não são totalmente compreendidos. Maya & González (1995) separam a Cordilheira Central em 5 unidades litodêmicas – Complexo Cajamarca, Complexo Quebrada Grande, Complexo Arquia, Vulcânicas Mesozóicas e Rochas Metamórficas de alto Grau separadas por três grandes sistemas de falhas: San Jerónimo, Cauca-Romeral e Silvia-Pijao (Fig. 2).

Recentemente, Restrepo *et al.* (2009) propuseram outra divisão de terrenos tectono-estratigráficos, seguindo novos dados geocronológicos. Os terrenos se dividem do oriente para o ocidente em: Chibcha, Tahamí, Anaconda, Quebrada Grande, Amagá-Sinifaná, Arquia e Calima. Os terrenos Chibcha, Tahamí, Anaconda estão localizados a leste da falha San Jerónimo e são interpretados como rochas de origem essencialmente continental. Já os terrenos de Quebrada Grande, Amagá-Sinifaná, Arquia e Calima ocorrem entre as falhas de Cauca e Romeral e são compostos predominantemente por rochas de evolução oceânica.

As rochas mais antigas expostas no Distrito Mineiro de Marmato estão inseridas no Complexo Arquia (Maya & González, 1995), que é composto por várias unidades de rochas metamórficas (Toussaint & Restrepo, 1975), incluindo xistos e anfibolitos com afinidade oceânica (Orrego *et al.*, 1993). No Distrito Mineiro de Marmato também afloram rochas sedimentares da Formação Amagá (Tassinari *et al.*, 2008), formada durante o Mioceno e o Oligoceno (Van den Hammen, 1958) e afetada por intensa deformação e manifestações vulcânicas episódicas (Sierra, 1994).

O magmatismo Combia no Distrito de Marmato, ao qual pertence o sistema pórfiro Yarumalito, intrudiu os xistos do Complexo Arquia e as rochas sedimentares da Formação Amagá (Tassinari *et al.*, 2008). Segundo González (1980), o Rio Cauca separa o Vulcanismo Miocênico (Formação Combia) do Complexo Arquia.

Figura 2. Seção geológica do contato do vulcanismo mioceno (Formação Combia), indicado na fig. 1B com o Complexo Arquia segundo González (1980).

2.2. Formação Combia

A Formação Combia aflora no noroeste Colombiano, na bacia do rio Cauca, entre as Cordilheiras Ocidental e Central e corresponde a uma sequência vulcano-sedimentar originada por vários pulsos magmáticos entre 12 Ma e 6 Ma (López *et al.*, 2006). A unidade foi descrita pela primeira vez por Grosse (1926). González (1976) separou-a em dois membros: Membro inferior – de caráter vulcânico, composto por derrames basálticos e diques andesíticos, e o Membro superior – de caráter vulcanoclástico, com predomínio de rochas piroclásticas mal consolidadas. Estas rochas representam os registros mais jovens do vulcanismo neógeno noroeste colombiano (Marriner & Millward, 1984).

Devido ao fato dos pórfiros estarem localizados entre o sistema de falhas Cauca-Romeral e San Jerónimo, Restrepo *et al.* (1981) e Toussaint & Restrepo (1999) supõem que este magmatismo esteve relacionado a um sistema de bacias *pull apart*, que teria funcionado como uma zona que afetou o embasamento no Mioceno e facilitou a ascensão, intrusão dos magmas e o alojamento de corpos vulcânicos relacionados às rochas efusivas do membro superior da Formação Combia (Jaramillo, 1978; Restrepo *et al.*, 1981; Álvarez & Linares, 1983; Toussaint & Restrepo, 1991; Sierra, 1994; Toussaint & Restrepo, 1999). As características das rochas intrusivas subvulcânicas indicam que as mesmas são de cristalização pouco profunda com resfriamento rápido. Suas formas sugerem cones vulcânicos constituídos por magmas silicificados em condutos de vulcões erodidos (Álvarez, 1983). A esta atividade sucede outra fase entre 7 e 6 Ma, na qual se processaram as intrusões dos corpos dos sistemas la Felisa, Marmato, Irra (Restrepo *et al.*, 1981; Toro *et al.*, 1999; Vinasco, 2001; Frantz *et al.*, 2003) e Yarumalito.

Por outro lado, outros autores sugerem que o magmatismo mioceno por ser de caráter intermediário e ocorreu por um grande período de tempo. Este magmatismo seria gerado pela mudança do grau de convergência da Placa de Nazca sob a margem noroeste da América do Sul (Aspden *et al.*, 1987; Maya, 1992; Risnes, 1995; Chicangana, 2004).

2.3. Geologia local

2.3.1 Geologia da área do sistema pórfiro Yarumalito

A geologia local da área do sistema pórfiro Yarumalito é pouco conhecida. O primeiro registro ocorreu no relatório técnico elaborado por Thompson (2006) para a empresa *Colombian Mines Corporation*. Segundo aquele autor, a área do atual projeto Yarumalito é dominada por apófises do *stock* de Marmato, de composição andesítica a dacítica, que intrudiram as rochas vulcânicas e vulcanoclásticas da Formação Combia. Em zonas de contato, as rochas são metassomatizadas gerando cornubianitos. Estas zonas geralmente contêm

pirita disseminada com menores volumes de calcopirita, esfalerita e galena. Thompson (2006) descreve três domínios de falhas na área. Os sistemas de falhas são orientados segundo direções noroeste, leste-oeste e norte-sul. A maioria das estruturas geradoras de veios de quartzo com pirita tende a se organizar segundo a direção noroeste, de N45W a N60W. As estruturas leste-oeste estão associadas à intensa brechação e ar-

gilização com sulfetos semimaciços, são subverticais e variam de 30 cm a mais de 4 m de largura. O terceiro domínio estrutural tende a ter direção norte-sul e pode conter sulfetos semimaciços e quartzo subordinado.

No mapa inédito cedido pela empresa *Colombian Mines Corporation* para este estudo (Fig. 3), é possível também observar a presença de brechas intrusivas em zonas de contato de intrusões subvulcânicas.

Figura 3. Mapa geológico simplificado da área do Projeto Yarumalito (inédito, cedido pela empresa *Colombian Mines Corporation*).

2.4 Materiais utilizados

A empresa *Colombian Mines Corporation* disponibilizou 3 furos de sondagem representativos da área para descrições e amostragem. A amostragem foi direcionada para estudos petrográficos, que objetivaram o reconhecimento e diferenciação das rochas subvulcânicas quando afetadas, ou não, por alteração hidrotermal e caracterização das rochas a serem datadas.

Para fins de geocronologia, a empresa também disponibilizou amostras de duas intrusões do sistema pórfiro Yarumalito. As amostras selecionadas para datação U-Pb em zircão foram denominadas de YARNV e YARSV. A amostra YARNV é proveniente da intrusão diorítica localizada na região norte da área do sistema pórfiro Yarumalito e a YARSV representa a intrusão andesítica. Ambas as amostras foram coletadas em sítios onde o hidrotermalismo foi menos intenso, ou mesmo não chegou a afetar as amostras.

De qualquer forma, mesmo considerando que as amostras foram submetidas a intenso hidrotermalismo, o sistema U-Pb em zircão tem sido considerado um método robusto devido à resistência química do zircão e é

capaz de fornecer a idade de cristalização de rochas ígneas, mesmo quando considerada condição extrema de alteração hidrotermal (e.g., Davis & Krogh, 2000). O zircão, comparativamente a outros minerais portadores de Pb, tem a maior temperatura de fechamento para difusão deste elemento, que chega a exceder os 900°C para cristais de tamanho comum (Cherniak & Watson, 2000).

2.5 Metodologia utilizada para geocronologia

Considerando as características das amostras (subvulcânicas, com grãos pequenos, e idade esperada muito jovem por pertencerem ao magmatismo Combia, do Mioceno), o equipamento escolhido para datação U-Pb em zircão foi o *Secondary Ion Mass Spectrometer* (SIMS), que permite análises localizadas em diminutos pontos nos grãos, aliada a alta precisão. As análises foram realizadas no Centro de Pesquisas Geocronológicas da Universidade de São Paulo (CPGeo/USP), no modelo *Sensitive High Resolution Ion Microprobe IIe* (SHRIMP IIe).

As amostras foram submetidas ao preparo convencional para separação de zircão no Laboratório de Preparação do Instituto de Geociências da Universida-

de Federal do Rio Grande do Sul. A separação incluiu quebra, moagem e peneiração das amostras utilizando materiais descartáveis para evitar contaminação, seguida de pré-concentração de minerais pesados por bateia. O material concentrado foi separado em frações através de separador eletro-magnético Frantz e, posteriormente, as frações não magnéticas foram purificadas manualmente utilizando lupa binocular.

Os concentrados de zircão foram montados em resina epoxy no CPGeo/USP. As *mounts* foram lixadas até remoção de aproximadamente metade do grão, de forma a expor as estruturas internas. Após polimento, foram cobertas por fina camada de ouro para imageamento por catodoluminescência (CL) no Microscópio Eletrônico de Varredura do CPGeo/USP.

Para normalização da concentração de U- Pb -Th foi utilizado o padrão internacional de zircão SL13 (238 ppm) e a normalização da razão $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ foi executada com a utilização do padrão natural Temora 2, de idade 416,78 Ma (Black *et al.*, 2004). As condições de análises foram: *spot size* = 30 μm , 5 *scans*, *dead time* = 25 ns e *source slit* = 80 μm . Para o tratamento de dados foi utilizado o programa Squid 1.06 (Ludwig, 2002) e os gráficos e cálculo de idade foram realizados com auxílio do programa Isoplot 4 (Ludwig, 2012).

3 Resultados

3.1 Rochas subvulcânicas do sistema pórfiro Yarumalito

Com base nos estudos dos testemunhos de sondagem YAR-06, YAR-17 e YAR-19, cedidos pela empresa *Colombian Mines Corporation*, é possível observar que o sistema pórfiro Yarumalito possui ao menos duas fases de rochas intrusivas mineralizadas. A fase principal (Fase 1) intrude as rochas mais antigas e aparente-

mente estéreis da Formação Combia, e uma fase menor (Fase 2), que ocorre de forma localizada, intrude as rochas da Fase 1. Neste trabalho, os estudos geocronológicos foram focados nestas duas intrusões no intuito de determinar a idade principal do sistema pórfiro Yarumalito, pertencente ao magmatismo Combia.

A Fase 1 é representada por intrusivas de características pórfiras, composição andesítica e que se encontra mineralizada. Rochas desta fase ocorrem nos 3 testemunhos estudados. Relacionados com a fase intrusiva principal, existem quatro tipos de alteração hidrotermal: argílica, propilítica, fílica e potássica. A Fase 2 é representada por um corpo de composição diorítica, identificado somente no testemunho YAR-19.

3.1.1 Fase 1 - Pórfiro Andesítico

O pórfiro andesítico possui textura inequigranular porfirítica, composta de fenocristais de plagioclásio (45 %) e biotita (5 %), e uma matriz fanerítica muito fina (49 %) composta de quartzo, feldspato e biotita (Fig. 4A). Minerais acessórios comuns são a apatita e o zircão. Os fenocristais de plagioclásio são euédricos, tabulares e variam de 1 a 5 mm, muitos possuem macla do tipo Carlsbad e também macla polissintética. Alguns dos fenocristais de plagioclásio apresentam zoneamento oscilatório, com o núcleo comumente corroído e fraturado, e algumas vezes começando a alterar para biotita. É também comum observar 2 ou 3 fenocristais de plagioclásio intercrescidos (Fig. 4B), gerando localmente textura glomeroporfirítica. Os fenocristais de biotita são euédricos, de 1 a 3 mm, com pleocroísmo de amarelo claro a castanho. A matriz é extremamente fina, o que dificulta a identificação dos minerais, porém é possível distinguir biotita, feldspato potássico e plagioclásio ocorrendo como grãos subidiomórficos.

Figura 4. Fotomicrografias do pórfiro andesítico sob luz polarizada com nicóis cruzados mostrando. A) Aspecto textural geral da rocha com textura porfirítica, com grãos de plagioclásio imersos em matriz muito fina; B) Detalhe mostrando intercrescimento de plagioclásio com maclas tipo Carlsbad. PI – plagioclásio.

3.1.2 Fase 2 - Pórfiro Diorítico

O pórfiro diorítico possui textura inequigranular hipidiomórfica (Fig. 5A). A mineralogia é composta de plagioclásio (70 %), hornblenda (20 %), augita (5%) e quartzo (4 %). Apatita e zircão são minerais acessórios (1 %). Os grãos de plagioclásio variam de 1 a 4 mm, são euédricos, tabulares e por muitas vezes exibem textura seriada; apresentam maclas do tipo Carlsbad e polisintética e seu ângulo de extinção é típico da Labradorita. Alguns dos plagioclásios possuem zoneamento oscilatório. Os cristais de hornblenda são subédricos e com

tamanho de 1 a 3 mm quando ocorrem como fenocristais. O mineral também ocorre de forma intergranular entre os plagioclásios (Fig. 5B) e seu pleocroísmo varia de verde claro a verde. Magnetita, pirita e calcopirita em forma de agregados arredondados são encontradas em zonas de fraqueza da hornblenda, geralmente na clivagem, mas também nas bordas dos fenocristais. A augita é rara e ocorre como cristais subédricos também associada à hornblenda seu tamanho varia de 0,8 a 1 mm e apresenta pleocroísmo de amarelo claro a verde claro. O quartzo é encontrado na forma de aglomerados xenomórficos de 6 a 10 mm com extinção ondulante.

Figura 5. Fotomicrografias do pórfiro diorítico sob luz polarizada com nicóis cruzados mostrando. A) Aspecto textural geral mostrando grãos de plagioclásio de vários tamanhos, característico de textura seriada, e hornblenda com pirita; B) Detalhe de grão de plagioclásio do tipo Labradorita, com hornblenda intersticial. Pl – plagioclásio; Hb – hornblenda; Py – pirita.

3.2 Geocronologia

As análises foram obtidas a partir de grãos selecionados de forma randômica, visando incluir todas as tipologias de zircão presentes na rocha. Como o principal objetivo era definir as idades de cristalização dos dois corpos intrusivos, o estudo prévio e minucioso das imagens CL buscou identificar as áreas representativas da cristalização ígnea dos corpos em questão. Para caracterizar as possíveis heranças, algumas poucas análises foram executadas também no centro de grãos da amostra YARSV, proveniente do andesito pórfiro.

3.2.1 Características dos grãos de zircão

Após a purificação final do concentrado de zircão, foram realizadas descrições das populações morfológicas das duas amostras a serem datadas, YARNV (diorito, Fase 2) e YARSV (andesito, Fase 1), através de lupa binocular e, posteriormente, por imagens de catodoluminescência.

A amostra YARNV, proveniente do diorito pórfiro da Fase 2, apresenta duas populações de zircões. A primeira é constituída de cristais prismáticos do tipo

3:2, com cerca de 0,2 mm de comprimento. A segunda população contém cristais um pouco maiores, também prismáticos, porém mais alongados, chegando a uma proporção de 4:1 e comprimento máximo de cerca de 0,4 mm. As duas populações identificadas são compostas por grãos translúcidos. Através das imagens de catodoluminescência (Fig. 6) foi possível observar que ambas as populações apresentam zonação oscilatória, típica de cristais ígneos e que alguns grãos possuem núcleos que, por sua aparência, são sugestivos de herança. Não há presença de bordas de recrystalização, conforme esperado por tratar-se de rocha ígnea sem processos metamórficos superimpostos e nem corrosão ou porosidades, características de grãos quando submetidos a forte hidrotermalismo conforme Corfu *et al.* (2003).

A amostra YARSV, proveniente da intrusiva andesítica – fase 1, também apresenta duas populações de zircão. Uma das populações é composta por grãos prismáticos de aproximadamente 0,15 mm de comprimento, pouco alongados, com proporção de 3:2 em relação à largura. A outra população é composta por grãos maiores, também prismáticos, mas um pouco mais alongados, chegando a uma proporção de 3:1 e compri-

mento máximo de cerca de 0,4 mm. As duas populações identificadas são compostas por grãos translúcidos. O estudo das imagens de catodoluminescência (Fig. 7) permitiu observar zonamento característico de zircão

ígneo nas duas populações. Nesta amostra, aparentemente os grãos com núcleos sugestivos de herança são mais frequentes. Não há presença de bordas de recristalização ou porosidades nas margens.

Figura 6. Imagens por catodoluminescência de grãos de zircões separados a partir da amostra YARNV proveniente de intrusão diorítica – Fase 2, parte norte do sistema pórfiro Yarumalito. Os valores indicados nos grãos correspondem aos nomes dos pontos indicados na Tabela 1.

Figura 7. Imagens por catodoluminescência de grãos de zircões separados a partir da amostra YARSV proveniente de intrusão andesítica – Fase 1, parte sul do sistema pórfiro Yarumalito. Os valores indicados nos grãos correspondem aos nomes dos pontos indicados na Tabela 2.

3.2.2 Idades SHRIMP U-Pb em zircão do pórfiro diorítico

Para a amostra YARNV foram executadas dezoito análises no mesmo número de grãos. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 1. Em função da pouca significativa produção de ^{207}Pb , a idade de rochas muito jovens pode ser calculada a partir da média ponderada da razão $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (e.g., Maksaev *et al.*, 2004). O conjunto de razões determinadas para a amostra YARNV é bastante consistente, porém para o cálculo da média ponderada, os dados do spot 14 (marcado em azul na fig. 8) foi desconsiderado devido ao seu grande conteúdo de Pb comum. A média ponderada obtida

a partir dos demais quinze dados é de $6,95 \pm 0,16$ Ma com MSWD de 1,07. Esta idade é considerada bastante precisa e representa a idade de cristalização do diorito pórfiro da Fase 2, localizado na região norte do sistema Yarumalito.

As variações observadas nas razões Th/U são bem restritas, com valores que oscilam entre 0,24 a 0,42 para as análises consideradas no cálculo de idade do corpo diorítico. Estas razões são compatíveis com a composição da maioria dos cristais de zircão de origem ígnea e que não foram afetados por perturbações metamórficas.

Figura 8. Resultados da datação U-Pb em zircão por SHRIMP de amostra de diorito pórfiro (Fase 2) YARNV. A) Diagrama mostrando a distribuição das idades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dos cristais de zircão provenientes da amostra YARNV; B, C e D) Imagens por catodoluminescência de grãos analisados mostrando as características comuns nas populações de zircão da amostra diorítica, como o zonação oscilatória, ausência de bordas recrystalizadas ou margens porosas, e os locais das análises com suas respectivas idades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

Tabela 1. Resultados isotópicos U-Pb em zircão por SHRIMP da amostra de diorito pórfiro (Fase 2) YARNV. Os pontos marcados com asteriscos correspondem a dados analíticos que não foram utilizados no cálculo da idade.

Nome do ponto	ppm U	ppm Th	²³² Th / ²³⁸ U	ppm ²⁰⁶ Pb	204 /206	% comm 206	Total 238 /206	% err	Total 207 /206	% err	206 /238	% err	Idade ²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	1σ err
YARNV-1.1	139	37	0,27	0,2	---	0,00	753,10	6,2	,1359	16,5	,0011	6,2	7,6	0,5
YARNV-2.1	321	129	0,42	0,3	---	0,00	826,97	3,0	,0902	8,9	,0011	3,0	7,4	0,2
YARNV-3.1	195	65	0,34	0,2	---	0,00	868,36	3,4	,1370	13,1	,0010	3,4	6,6	0,3
YARNV-4.1	171	49	0,29	0,2	---	0,00	803,71	3,5	,1467	12,0	,0011	3,5	7,0	0,3
YARNV-5.1	236	91	0,40	0,3	---	6,28	801,64	3,2	,1423	15,2	,0011	3,2	7,1	0,3
YARNV-6.1	178	69	0,40	0,2	---	0,00	830,88	5,2	,1239	11,0	,0010	5,2	7,0	0,4
YARNV-7.1	155	51	0,34	0,2	---	0,00	783,98	3,9	,1912	12,8	,0009	3,9	6,7	0,4
YARNV-8.1	200	50	0,26	0,2	---	0,00	858,80	3,4	,1309	8,8	,0010	3,4	6,7	0,3
YARNV-9.1	163	43	0,27	0,2	---	0,00	808,68	3,6	,1689	12,4	,0010	3,6	6,7	0,4
YARNV-10.1	165	55	0,35	0,2	---	0,00	782,73	3,6	,1324	16,9	,0011	3,6	7,3	0,4
YARNV-11.1	202	67	0,34	0,2	---	0,00	864,95	3,4	,1456	11,2	,0010	3,4	6,5	0,3
YARNV-12.1	320	118	0,38	0,3	---	0,00	890,08	3,0	,0714	11,4	,0011	3,0	7,0	0,2
YARNV-13.1	145	47	0,33	0,1	---	0,00	864,76	4,0	,1042	12,6	,0010	4,0	6,9	0,3
YARNV-14.1*	241	49	0,21	0,3	---	13,97	686,09	4,3	,1220	9,2	,0013	4,3	8,5	0,4
YARNV-15.1	174	59	0,35	0,2	---	0,00	834,60	6,0	,1422	19,7	,0010	6,0	6,8	0,5
YARNV-16.1	250	58	0,24	0,6	---	36,22	381,92	2,7	,4631	6,6	,0012	2,7	8,0	1,3
YARNV-17.1	184	49	0,28	0,2	---	0,00	793,01	3,6	,1015	14,1	,0011	3,6	7,6	0,3
YARNV-18.1	213	60	0,29	0,2	---	0,00	862,91	4,2	,1508	12,3	,0010	4,2	6,5	0,3

3.2.3 Idades SHRIMP U-Pb em zircão do pórfiro andesítico

Para a amostra YARSV dezenove pontos analíticos foram executados, conforme tabela 2. Das análises realizadas, três foram localizadas em núcleos herdados. Estes apontaram para contribuições de terrenos de idades do Neoproterozoico (592 ± 14 Ma), Ordoviciano (459 ± 9 Ma) e Jurássico ($163 \pm 4,7$ Ma). Devido ao alto conteúdo de U, cuja radiação causa destruição do retículo cristalino e consequentemente perturbação do sistema isotópico, o dado do ponto analítico YARSV 10.2 (Fig. 9B) foi retirado do cálculo. Assim, os demais

quinze pontos analisados constituem uma população de composição isotópica unimodal, que forneceu a média ponderada das idades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de $7,00 \pm 0,15$ Ma com MSWD de 1,08. Este resultado representa a idade de cristalização deste corpo e da Fase 1.

As razões Th/U variam de 0,21 a 0,53 para as análises consideradas no cálculo de idade do corpo andesítico. Estas razões são compatíveis com corpos ígneos sem perturbações metamórficas, mas aparentemente variam levemente mais do que as observadas nos cristais de zircão do pórfiro diorítico. Os valores da razão para os núcleos herdados tendem a ser mais elevados.

Tabela 2. Resultados isotópicos U-Pb em zircão por SHRIMP da amostra de andesito pórfiro (Fase 1) YARSV. Os pontos marcados com asteriscos correspondem a dados analíticos que não foram utilizados no cálculo da idade.

Nome do ponto	ppm U	ppm Th	²³² Th / ²³⁸ U	ppm ²⁰⁶ Pb	204 /206	% comm 206	Total 238 /206	% err	Total 207 /206	% err	206 /238	% err	Idade ²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	1σ err
YARSV-1.1	230	78	0,35	0,2	---	20,49	894,25	3,6	,0868	11,2	,0009	11,3	6,8	0,3
YARSV-2.1	290	102	0,37	0,3	---	6,15	867,70	3,0	,0859	8,8	,0011	4,7	7,1	0,2
YARSV-3.1	217	83	0,40	0,2	---	0,00	851,59	3,3	,1144	11,3	,0012	3,3	6,9	0,3
YARSV-4.1	145	72	0,51	0,1	---	0,00	857,23	3,8	,0907	14,6	,0013	5,0	7,1	0,3
YARSV-5.1	120	31	0,27	0,1	---	0,00	836,11	4,0	,1303	12,0	,0016	13,1	6,9	0,3
YARSV-6.1*	428	451	1,09	27,1	---	0,00	13,55	2,0	,0564	1,0	,0737	2,0	459,0	8,9
YARSV-7.1*	220	127	0,60	18,2	---	0,00	10,37	2,5	,0606	1,4	,0965	2,5	592,6	14,4
YARSV-8.1	685	160	0,24	1,0	---	0,00	587,10	3,5	,2786	3,7	,0012	11,8	7,7	0,5
YARSV-9.1	595	144	0,25	0,6	---	0,00	851,60	2,5	,0679	6,4	,0012	2,5	7,4	0,2
YARSV-10.1*	81	37	0,47	1,8	---	1,32	38,71	2,9	,0565	4,1	,0255	3,0	163,0	4,7
YARSV-10.2*	1033	297	0,30	1,6	---	109,97	538,62	2,6	,2380	4,9	-,0002	153,3	9,1	0,5
YARSV-11.1	175	56	0,33	0,2	---	0,00	886,66	3,6	,1158	10,4	,0011	3,6	6,6	0,3
YARSV-12.1	149	49	0,34	0,1	---	0,00	863,78	6,1	,1195	13,2	,0012	6,6	6,8	0,5
YARSV-13.1	193	80	0,43	0,2	---	0,00	860,32	3,6	,1477	10,2	,0011	12,2	6,5	0,3
YARSV-14.1	96	27	0,29	0,1	---	0,00	825,32	4,6	,1821	19,3	,0018	5,4	6,5	0,5
YARSV-15.1	185	76	0,42	0,2	---	0,00	854,62	4,2	,1324	9,1	,0012	4,2	6,7	0,3
YARSV-16.1	138	58	0,44	0,1	---	0,00	805,49	3,9	,1057	12,9	,0014	4,0	7,4	0,3
YARSV-17.1	164	34	0,21	0,2	---	0,00	827,10	3,6	,1061	11,1	,0012	3,6	7,2	0,3
YARSV-18.1	202	103	0,53	0,2	---	0,00	856,92	3,4	,1069	9,3	,0008	12,0	6,9	0,3

Figura 9. Resultados da datação U-Pb em zircão por SHRIMP de amostra de andesito pórfiro (Fase 1) YARSV. A) Diagrama mostrando a distribuição das idades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dos cristais de zircão provenientes da amostra YARSV; B) Imagem por catodoluminescência de grão analisado mostrando núcleo herdado com idade Jurássica e borda analisada, mas com resultado descartado do cálculo devido a alto teor de Urânio; C e D) Imagem por catodoluminescência ilustrando as principais características do zircão analisado, tais como a zonação oscilatória, ausência de bordas recrystalizadas ou margens porosas, e os locais das análises com suas respectivas idades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

4 Discussão dos Resultados

Com o objetivo de datar as intrusivas hospedeiras da mineralização de Au no sistema pórfiro Yarumalito, duas amostras foram selecionadas para datação geocronológica por U-Pb em zircão: uma coletada na região sul e representativa da Fase 1 de composição andesítica, denominada de YARSV, e outra proveniente da intrusão diorítica de Fase 2, coletada na região norte do projeto, amostra YARNV.

A amostra YARSV, proveniente do pórfiro andesítico, apresenta duas populações de zircão com grãos translúcidos prismáticos, uma com proporções de 3:2 e outra, 3:1. As imagens de catodoluminescência mostram cristais com zonamentos característicos de ro-

chas ígneas e eventuais núcleos herdados, entretanto sem bordas recrystalizadas ou porosas, o que demonstra preservação a processos subsequentes como metamorfismo ou hidrotermalismo, segundo conceitos de Corfu *et al.* (2003). Os resultados analíticos para a intrusiva andesítica indicaram idade $7,00 \pm 0,15$ Ma com MSWD de 1,08, que representa a idade de cristalização este corpo e da Fase 1. Os núcleos herdados datados indicaram variedade nas contribuições a partir do embasamento, com idades provenientes de terrenos do Neoproterozoico (592 ± 14 Ma), Ordoviciano (459 ± 9 Ma), que representam rochas do embasamento cristalino dos Andes centrais (Toussaint & Restrepo, 1999) e Jurássico ($163 \pm 4,7$) com provável proveniência do Batólito Ibaqué que se localiza à oeste da área de estudo.

A amostra YARNV, do pórfiro diorítico, também apresenta duas populações de zircão compostas por grãos translúcidos e com cristais um pouco maiores que os identificados na amostra YARSV. Uma das populações chega a ter proporções 4:1 entre comprimento e largura. Núcleos herdados parecem ser menos frequentes e não foram investigados quanto à sua idade. Imagens de catodoluminescência permitem identificar o zonamento ígneo nas duas populações e também ausência de bordas perturbadas por processos posteriores. Os resultados apontam para a idade de $6,95 \pm 0,16$ Ma com MSWD de 1,07 a partir da média ponderada da idade $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, considerada como de cristalização da Fase 2 e demonstrando um pequeno intervalo de idade entre as duas fases ígneas mineralizadas identificadas no sistema pórfiro Yarumalito.

Dados geocronológicos disponíveis para o magmatismo Combia na região do Distrito de Marmato e arredores, apontam para uma fase entre 7 e 6 Ma na qual se dariam as intrusões dos corpos dos sistemas la Felisa, Marmato e Irra, conforme dados K-Ar de Restrepo *et al.* (1981) e informações de traços de fissão conforme Toro *et al.* (1999). O pórfiro de Marmato, que hospeda o mais conhecido prospecto mineiro na região, foi previamente datado por Frantz *et al.* (2003) por U-Pb em zircão por SHRIMP. Os dados estabeleceram uma idade de 6,7 Ma para o *stock* principal. Os dados aqui obtidos para o sistema pórfiro Yarumalito são concordantes com estes trabalhos e estabelecem o intervalo entre 6,7 e 7,0 Ma como um importante período para a intrusão de corpos portadores de mineralizações de ouro no Distrito de Marmato.

5. Conclusões

Os resultados geocronológicos obtidos através de datações U-Pb em zircão por SHRIMP apontam para um magmatismo apenas um pouco mais antigo no prospecto Yarumalito em relação às demais intrusões mineralizadas no Distrito de Marmato. As idades sugerem uma evolução das rochas pórfiras mineralizadas a ouro no sistema Yarumalito de 7,00 Ma, para a Fase 1 composta por intrusivas de caráter andesítico, a 6,95 Ma para a Fase 2 diorítica. Estas idades indicam que o sistema pórfiro Yarumalito e o de Marmato pertencem ao mesmo evento magmático ou vulcânico, ambos portadores de mineralização de ouro na região. As intrusões férteis para ouro no Distrito de Marmato são posicionadas no intervalo entre 7,00 Ma e 6,7 Ma, no qual ocorreram as intrusões das rochas pórfiras hospedeiras dos depósitos de ouro conhecidos. Esta informação possui importante significado do ponto de vista prospectivo para a região e o conhecimento geocronológico deve ser detalhado conforme avançar o conhecimento dos processos hidrotermais concentradores do ouro nestes pórfiros. Já do ponto de vista regional, os resultados para as idades do magmatismo são compatíveis com as idéias postuladas por Restrepo *et al.* (1981) e

Toussaint & Restrepo (1999) que sugerem uma atividade ígnea relativamente rápida para o magmatismo Combia, ao menos na região do Distrito de Marmato.

Agradecimentos - Ao CNPq pela bolsa de mestrado de IAH, desenvolvida junto ao PPGGEO/UFRGS. Os autores agradecem a *Colombian Mines Corporation* pelo suporte e cedência dos testemunhos de sondagem e amostras. A Alan Cardenas pelo inestimável apoio durante os trabalhos realizados na Colômbia e aos revisores deste trabalho, Joseneusa Rodrigues e André Borba pelos excelentes comentários e elucidações.

Referências

- Álvarez, A. & Linares, E. 1983. Geología de la Cordillera Central y el Occidente colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Mesocenoicos. *Boletín Geológico*, 33: 175
- Aspden, J. A., McCourt, W. J. & Brook, M. 1987. Geometrical Control of Subduction – Related Magmatism: The Mesozoic and Cenozoic Plutonic History of Western Colombia. *Journal Geological Society London*, 144: 893-905.
- Black, L.P., Kamo, S., Allen, C.M., Davis, D., Aleinikoff, J., Valley, J., Mundil, R., Campbell, I.A., Korsch, R., Williams, I. & Foudoulis, C. 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chemical Geology*, 205: 115-140.
- Bustamante, A.B. 2003. *Definição das trajetórias P-T-t em rochas metamórficas do flanco ocidental da cordilheira Central da Colômbia, nas regiões de Caldas e El Retiro*. São Paulo, 107p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Cediel, F., Shaw, R.P. & Caceres, C. 2003. Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In: Bartolini, C., Buffler, R.T., Blickwede, J. (Eds.). *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation and Plate Tectonics. American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 79: 815-848.
- Cherniak, D.J. & Watson, E.B. 2000. Pb diffusion in zircon: *Chemical Geology*, 172: 5-24.
- Chicangana, G. 2004. La Zona de Fallas Romeral: una zona de subducción extinta, deformada y cizallada que sirve de contacto entre una litosfera oceánica y una continental en el norte de Sudamerica. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE SISMOLOGÍA PONENCIA, 1., 2004, Armenia, Colombia.
- Corfu, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O. & Kinny, P. 2003. Atlas of Zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 469-500.
- Davis, D.W. & Krogh, T.E. 2000. Preferential dissolution of ^{234}U and radiogenic Pb from α -recoil-damaged lattice sites in zircon: Implications for thermal histories and Pb isotopic fractionation in the near surface environment. *Chemical Geology*, 172: 41-58.
- Frantz, J.C., Ordoñez-Carmona, O., Franco, E., Groves, D.I. & McNaughton, N. 2003. Marmato Porphyry Intrusion, Ages and Mineralization. In: CONGRESO COLOMBIANO DE GEOLOGIA, 9., 2003, Medellín. *Anais... Medellín, Sociedad Colombiana de Geología*, v. 1, p. 54-55.

- González, H. 1976. *Geología de Cuadrángulo J8 Sonsón. Informe INGEOMINAS 1704*, 421p.
- González, H. 1980. Geología de las planchas 167 (Sónson) y 187 (Salamina). *Boletín Geológico INGEOMINAS*, 23(1): 1-174.
- Grosse, E. 1926. *Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia*. Berlín, Verlag Von Dietrich Reimer, 361p.
- Jaramillo, J. 1978. Determinación de las Edades de algunas Rocas de la Cordillera Central por el Método de Huellas Fisión. In: CONGRESO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA, 2., 1978, Bogotá. *Memorias...* Bogotá, v.1, p. 146.
- López A.C., Sierra, G & Ramírez, D.R. 2006. Vulcanismo Neógeno en el suroccidente Antioqueño y sus implicaciones tectónicas. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 19: 27-42.
- Ludwig, K.R. 2012. *ISOPLLOT 3.75, a geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley, Geochronology Center Special Publication, 75p.
- Maksaev, V., Munizaga, F., McWilliams M., Fanning, M., Mathur, R., Ruiz, J. & Zentilli, M. 2004. New chronology for El Teniente, Chilean Andes, from U/Pb, 40Ar/39Ar, Re-Os and fission track dating: Implications for the evolution of a supergiant porphyry Cu-Mo deposit: in Sillitoe, R.H., Perelló, J., and Vidal, C.E. (eds.) *Andean Metallogeny: New Discoveries, Concepts and Updates. Society of Economic Geologists, SEG Special Publication*, 11: 15-54.
- Marriner, G.F. & Millward, D. 1984. Petrochemistry of Cretaceous to recent Vulcanism in Colombia. *Journal of the Geological Society of London*, 141: 473-486.
- Maya, M. 1992. Catálogo de Dataciones Isotópicas en Colombia; Santa fé de Bogotá. *Boletín Geológico Ingeominas*, 32(1): 125-187.
- Maya, M. & González, H. 1995. Unidades Litodémicas de la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico Ingeominas*, 35(2): 435-7.
- Orrego, A., París, G., Ibanez, D. & Vásquez, E. 1993. *Mapa geológico de la Plancha 387 – Bolívar*. Medellín, Ingeominas, escala 1:100.000.
- Restrepo, J.J., Toussaint, J. & Gonzales, H. 1981. Edades mio-pliocénicas del magmatismo asociado a la Formação Combia, Departamento de Antioquia y Caldas. *Geología Norandina*, 3: 21-26.
- Restrepo, J.J., Ordóñez-Carmona, O., Martens, U. & Correa, A.M. 2009. *Terrenos, complejos y provincias en la Cordillera Central de Colombia. Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 9(2): 49-56.
- Risnes, K. 1995. *Geodynamique du sud – ouest des Andes colombiennes (dépression du Cauca – Patia) durant le Néogène. Approche paleomagnetique*. Genebra, 169p. Tese de Doutorado, Programa da Terra e Meio Ambiente, Universidade de Genebra.
- Rossetti, P. & Colombo, F. 1999. Adularia-sericite gold deposit of Marmato (Caldas, Colombia): field and petrographical data. In: McCaffrey, K.J.W., Lonergan, L., Wilkinson, J.J. (Eds.). *Fractures, Fluid Flow and Mineralization*. Londres, Geological Society of London, p. 167-182.
- Sierra, G.M. 1994. *Structural and Sedimentary Evolution of the Irra Basin, Northern Colombian Andes*. Nova Iorque, 102 p. Tese de Mestrado, Binghamton University.
- Sillitoe, R.H. 2008. Major gold deposits and belts of the North and South American Cordillera; distribution, tectonomagmatic settings, and metallogenic considerations. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 103(4): 663-687.
- Tassinari, C.G., Pinzon, F.D. & Ventura, J.B. 2008. Age and sources of gold mineralization in the Marmato mining district, NW Colombia: A Miocene-Pliocene epizonal gold deposit. *Ore Geology Reviews*, 33: 505-518.
- Thompson, R.T. 2006. *Yarumalito Project Technical Report*. Medellín, Colombian Mines Corporation, 73p. (Relatório Interno)
- Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. 1975. Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia, Colombia. *Publicacion Especial Geologia, Universidad Nacional Medellín*, 6: 1-24.
- Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. 1991. Migración del Magmatismo del Noroccidente Colombiano. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 5: 147.
- Toussaint, J.F. & Restrepo, J.J. 1999. *Evolucion Geológica de Colombia*. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 103p.
- Toro, G., Restrepo, J.J., Poupeau, G., Saenz, E. & Azdimousa, A. 1999. Datación por trazas de fisión de circones rosados asociados a la secuencia volcano – sedimentaria de Irra (Caldas). *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 13: 28-34.
- Van der Hammen, T. 1958. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes colombianos (con 7 planchas). *Boletín Geológico*, 6: 67-128.
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A, Winklerd, W. & Beltrán, A. 2011. Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central Cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125: 875-896.
- Vinasco, C.J. 2001. *A utilização da metodologia ⁴⁰Ar-³⁹Ar para o estudo de reativações tectônicas em zonas de cisalhamento. Paradigma: O Falhamento de Romeral nos Andes Centrais da Colômbia*. São Paulo, 85p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

Manuscrito 531.

Editores: Ana Maria P. Mizusaki & Paulo A. de Souza.