

Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências

**PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA DAS ROCHAS DA MINERALIZAÇÃO DE
Cu–Au DO DEPÓSITO ANTAS NORTE, PROVÍNCIA MINERAL DE
CARAJÁS (PA)**

Julio Cauhy Rodrigues

Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2016 / 26)**

São Paulo
2016

TF
R696
JC.p

Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências

**PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA DAS ROCHAS DA MINERALIZAÇÃO DE Cu–Au
DO DEPÓSITO ANTAS NORTE, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS (PA)**

Julio Cauhy Rodrigues



Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

IGc-Instituto de Geociências



Petrografia e geoquímica das rochas da mineralização de
Cu-Au do depósito Antas Norte, Província
M27120

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF-2016 / 26)

São Paulo
2016

TF
R696
JC. p

UNITED STATES DEPARTMENT OF JUSTICE
FEDERAL BUREAU OF INVESTIGATION

RECEIVED AT NEW YORK CITY
JANUARY 10 1964



NEW YORK CITY

COMMUNICATIONS SECTION

TELETYPE UNIT

(1-1011)

1-1011

1-1011

"Life would be tragic
if it weren't funny"
Stephen Hawking

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer ao Professor Caetano Juliani, pela orientação e oportunidade de trabalhar em um tema de meu interesse, ao geólogo Fábio Bertran por fornecer o material necessário para realização deste trabalho e pelo auxílio, e a empresa *Avanco Ltd* pela oportunidade de trabalhar com as amostras do depósito Antas Norte.

Ao MCT/CT-Mineral/CNPq, por meio do Projeto de Pesquisa CT-Mineral (Proc. 550.342/2011-7), intitulado Petrogênese e metalogênese da LIP (*Large Igneous Province*) Uatumã na porção sul do Cráton Amazônico, sob a coordenação do Prof. Caetano Juliani e MCT/CNPq/FAPESPA/PETROBRAS (Proc. 573.733/2008-2).

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Geociências da Amazonia (INCT-Geociam/Proc. 2403 - Subproj. 1/Grupo Geociam: Hidrotermal Processos Petrológicos e Metalogênese IG-USP).

A minha família, em especial meu veio (Cesarvinicius) e Dona Ana (mãe), por me proporcionarem tudo que foi necessário para que eu conseguisse realizar meus objetivos em minha vida, e por serem grandes exemplos para mim. A meus irmãos Vinicius e Felipe por serem grandes irmãos e também exemplos. A meus tios e tias, primos e primas, sempre presentes em minha vida. Aos meus avós e avôs, que estão marcados em mim como memórias muito boas de parte de minha vida.

Ao rebanho (Café, Hugão, Cauxbr23, Mormaço, Tio Dante, Manja, Cirilo, Bundinha, Garçon, Lucão, Tenia, Pepe, JoãozinhoDoMetal) por todas risadas, viagens, zueras e por cinco anos de amizade e por muitos mais que estão por vir. Ao pessoal da turma 55 e agregados (em especial a Pingola), por todas as viagens, perrengues, alegrias e ciladas que passamos juntos.

Gostaria de agradecer a todos os funcionários e funcionárias de todos os setores e da USP em geral, por fornecerem uma universidade completa. Aos meus professores, desde os do ensino fundamental até o universitário, por contribuírem com minha educação e formação pessoal.

Ao Samuca pela ajuda e trabalho com minhas amostras, a Claudia Tokashiki pela ajuda e disponibilidade na reta final deste trabalho, a Brenda e o Caue pelas ajudas e dicas.

Um agradecimento muito especial à galera do Jiu Jitsu, principalmente aos meus mestres Helton Gomes, Pedro Valença e Igor Schneider (Tigrão), por fazerem com que o tatame seja como uma segunda casa pra mim.

E por fim gostaria de agradecer a uma pessoa muito especial para mim, Maira Antunes Alves, por sua ajuda, conselhos, amizade, risadas e principalmente por sua companhia.

RESUMO

O depósito de Cu–Au Antas Norte, localiza-se no município de Curionópolis do estado do Pará e se insere na Província Mineral de Carajás (PMC). Os trabalhos de exploração mineral em desenvolvimento desde 2007 pela empresa *Avanco Resources Ltda*, permitiram a delimitação da distribuição espacial dos corpos de minérios e de seus teores, sugerindo que a mineralização seja do tipo IOCG, apesar de não atender integralmente a concepção de Hitzman *et al.* (1992) e Willians *et al.* (2005).

O presente estudo apresenta a caracterização dos eventos hidrotermais e de mineralização do depósito de Cu–Au Antas Norte, fundamentado em petrografia e geoquímica das rochas encaixantes da mineralização, para um melhor entendimento da gênese do depósito, comparativamente aos depósitos já estudados na PMC.

As rochas descritas correspondem a rochas metavulcânicas e metagabros fortemente hidrotermalizados do supergrupo Itacaiúnas, e foram divididas em quatro grupos: (1) metavulcânicas félsicas, (2) metavulcânicas máficas, (3) metavulcânicas intermediárias, (4) metagabro.

O sistema hidrotermal que atuou no depósito Antas Norte apresenta quatro fases principais de alteração hidrotermal, sendo elas: i) alteração sódico–cálcica, com formação de hornblenda hidrotermal, seguido de ii) alteração potássica, com formação de biotita e feldspato potássico subordinado, seguido por um evento de iii) cloritização, com substituição da hornblenda e da biotita por clorita e leucoxênio. Associada ao minério e anterior à cristalização dos sulfetos, ocorreu iv) alteração (Fe)–Cálcica com formação de hornblenda + apatita + ilmenita em estilo fissural, presente nas bordas de veios de sulfetos ou como fragmentos em brechas hidrotermais. . Junto à formação dos sulfetos ocorre gruneritização da hornblenda, e posteriormente à mineralização ocorrem vênulas de quartzo e carbonatos.

O depósito Antas Nortes apresenta diversas características em comum com os depósitos IOCGs da Província Mineral de Carajás, sendo elas: (1) As rochas hospedeiras hidrotermalizadas (metavulcânicas máficas, metavulcânicas félsicas, metavulcânicas intermediárias a máficas) pertencem ao Supergrupo Itacaiúnas; (2) a alteração hidrotermal se relaciona espacialmente com zonas de cisalhamento e intrusões de gabros metamorfizados; (3) intensa alteração sódica–cálcica inicial à qual se sobrepôs a alteração potássica, seguida pela cloritização e mineralização; (4) inclusões fluidas de composição variadas, indicando a diversidade de fluidos envolvidos no processo de alteração hidrotermal.

Abstract

The Cu-Au Antas Norte deposit is located at the Curionópolis city, state of Pará and belongs to the Carajás Mineral Province (CMP). The mineral exploration work in

development since 2007 by the Avanco Resources Ltda company allowed the delimitation of the spatial distribution of the ore bodies and their contents, suggesting that the mineralization is of IOCG-type, even though not fully meeting the concept proposed by Hitzman et al., (1992) and Williams et al., (2005).

This study presents the characterization of hydrothermal and mineralization events of the Cu-Au Antas Norte deposit, based on petrography and geochemistry of the mineralization host rocks, to better understand the deposit genesis and to compare it to previously studied deposits in the CMP.

The described rocks correspond to metavolcanics and strongly hydrothermalized metagabbros of the Itacaiúnas Supergroup, and were divided into four groups: (1) felsic metavolcanics, (2) mafic metavolcanics, (3) intermediate metavolcanics, (4) metagabbros. The hydrothermal system responsible for the formation of the Antas Norte deposit has four main phases of hydrothermal alteration, which are: i) sodic-calcic alteration, forming hydrothermal hornblende, followed by ii) potassic alteration, with the formation of biotite and scarce potassium feldspar, followed by iii) a chloritization event, with replacement of hornblende and biotite by chlorite and leucoxene. Associated with ore and prior to the crystallization of sulfides iv) (iron)-calcic alteration with formation of fissural hornblende + apatite + ilmenite on the edges of sulfides veins or as fragments in hydrothermal breccia. Along the formation of sulfides occurs the transformation of hornblende to grunerite, and veinlets of quartz and carbonates after the mineralization.

The Antas Norte deposit has several features in common with the IOCGs deposits of the Carajás Mineral Province, as follows: (1) hydrothermalized host rocks (mafic metavolcanics, felsic metavolcanics, intermediate to mafic metavolcanics) belong to the Itacaiúnas Supergroup; (2) hydrothermal alteration relates spatially with shear zones and metamorphosed gabbro intrusions; (3) intense initial sodic-calcic alteration superimposed on potassic alteration, followed by chloritization and mineralization; (4) fluid inclusions of varying composition, indicating the diversity of fluids involved in the hydrothermal alteration process.

Sumário

Agradecimentos	2
RESUMO	3
Abstract	3
INTRODUÇÃO	10
1. OBJETIVOS	12
2. MATERIAIS E MÉTODOS	12
2.1 Revisão Bibliográfica	12
2.2 Preparação de Amostras	12
2.2.1 Análises geoquímicas	12
2.2.2 Seções Delgadas e Seções Delgado-Polidas	13
2.3 Petrografia	13
3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1.1 Depósitos de Óxido de Ferro–Cobre–Ouro (IOCG)	13
3.1.2 Província Mineral de Carajás	14
3.1.3 Supergrupo Itacaiúnas	15
3.1.4 O Depósito Antas Norte	15
3.1.5 Alterações Hidrotermais	16
4. RESULTADOS OBTIDOS	19
4.1 Caracterização das Unidades Petrográficas	19
4.1.1 Rochas Metavulcânicas Máficas Hidrotermalizadas	19
4.1.2 Rochas Metavulcânicas Félsicas Hidrotermalizadas	22
4.1.3 Metagabro	25
4.1.4 Rochas Meta-intermediárias e Máficas Hidrotermalizadas	29
4.1.5 Minérios e Brechas Associadas	32
4.2 Caracterização Petrográfica das Mineralizações	35
4.3 LITOQUÍMICA	40
5. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
5.1 Alterações Hidrotermais do Depósito Antas Norte	43
5.1.1 Alteração Cálctica–sódica	44
5.1.2 Alteração Potássica	44
5.1.3 Cloritização	45
5.1.4 Alteração (Fe)–Cálctica	45
5.1.5 Gruneritização	46
5.1.6 Alteração Propilítica	46

5.1.7	Turmalinização	46
5.1.8	Silicificação	46
5.2	Litoquímica	47
5.2.1	Rochas Metavulcânicas Félsicas	47
5.2.2	Rochas Metavulcânicas Intermediárias.....	48
5.2.3	Rochas Metavulcânicas Máficas.....	48
5.2.4	Metagabro.....	48
6.	CONCLUSÕES.....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

Figura 1: Localização da Mina Antas Norte e das áreas de pesquisa da *Avanco Resources Ltd.* (<http://www.avancoresources.com/content/projects/antas-north>)..... 10

Figura 2: Mapa Geológico do Domínio Carajás (Xavier *et al.*, 2012) e sua localização na Província Carajás, com a área do depósito Antas Norte assinalada no quadrado vermelho..... 11

Figura 3: Mapa geológico do depósito Antas do Norte elaborado pela *Avanco Resources Ltd.* (<http://www.avancoresources.com/content/projects/antas-north>)..... 16

Figura 4: Fotografias de amostras de testemunho de sondagem da unidade das rochas metavulcânicas máficas hidrotermalizadas, mostrando aspecto macroscópico das rochas. A: Apatita-hornblenda anfibolito grosso com brecha de calcopirita na porção superior esquerda da foto. B: Aspecto geral da metavulcânica máfica pouco alterada. C: Rocha hidrotermalizada com apatita grossa e hornblenda verde relacionada à mineralização de calcopirita. 19

Figura 5: Texturas e, composições mineralógicas representativas das rochas metavulcânicas máficas hidrotermalizadas, onde a fotomicrografia A correspondente à lâmina AAND-57A, as B, C e D à lâmina AANQ-40 (115,95 m), e as fotomicrografias E e F à lâmina ANDG-01 (40,10 m). A: Borda de alteração do veio de sulfeto brechado e com fraturas preenchidas por sulfetos. B: Porfiroclastos de clinoanfibólio incolor com inclusões arredondadas de quartzo. C: Alteração do clinoanfibólio para hornblenda verde, biotita parcialmente substituída por clorita e anfibólio azul. D: Vênula de turmalina idiomórfica marrom-azulada. E: Vênula oblíqua a foliação, preenchidas por clorita, plagioclásio, calcita e hornblenda, com apatita em menor volume. F: Aspecto geral do hornblenda-quartzo xisto com biotita, onde também pode ser observada uma foliação oblíqua à foliação predominante..... 21

Figura 6: Fotografias de amostras de testemunho de sondagem da unidade das rochas metavulcânicas félsicas hidrotermalizadas, mostrando aspecto macroscópico das rochas. A: Rocha leucocrática com bandas quartzosas (azuladas) e bandas quartzo-

feldspáticas (brancas) , com uma dobra no bandamento descontínuo. B: Rocha fina de coloração rósea devido ao feldspato hidrotemal, com epidoto (amarelo) e minerais opacos associados. C: Rocha félsica com alteração hidrotermal avançada associada a porções mineralizadas que resultou na forma cristalização de feldspato, anfibólio, apatita e ilmentia. 22

Figura 7: Fotomicrografias representativas do grupo das rochas metavulcânicas félsicas hidrotermalizadas, com as micrografias A e B da lâmina AAND-15B, C e D da AAND-15(A) e E e F da AAND-88 (35,80 m). A: Rocha granoblástica de composição quartzo–feldspática, com os minerais hidrotemais representados por minerais opacos e carbonato. B: Aspecto textural da porção mais grossa em contato com a parte mais fina da mesma rocha anterior. C: Aspecto dos minerais de alteração hidrotermal, com plagioclásio sericitizado, clorita e carbonato. D: Muscovita com hábito em leque em contato com clorita, produto da substituição do plagioclásio. E: Hornblenda marrom parcialmente substituída por hornblenda verde e clinozoisita. F: Alteração da hornblenda marrom para plagioclásio, quartzo e epídoto, com minerais opacos envolvidos por titanita. 25

Figura 8: Fotografias de amostras dos testemunhos de sondagem da unidade do dique de metagabro, mostrando aspecto macroscópico da unidade. A, B e C representam as rochas hidrotermalizadas associadas à mineralização de Cu–Au. D: Aspecto geral do metagabro pouco alterado. 26

Figura 9: Fotomicrografias do dique de metagabro. A fotomicrografia A corresponde a lâmina AAND-29 (63,15 m), as B e C da lâmina ANDG-69 (16,00 m), e as D, E e F da lâmina ANDG-69 (31,00 m). A: Aspecto geral do anfibolito, com porfiroblastos de hornblenda apresentando domínios internos com agregados de granulação fina a média. B: Dobras marcadas pela deformação dos agregados poligonais de quartzo. C: porfiroclasto de hornblenda marrom parcialmente substituído por clinozoisita. D: Vênula quartzo–feldspática preenchendo estruturas de abertura e preenchimento. E: Agregados de clorita com leucoxênio nos contatos e clivagens, com escapolita associada. F: Veio de minerais opacos e bordas de alteração com hornblenda hidrotermal. Os contatos entre os cristais de hornblenda e minerais opacos são marcados pela presença de plagioclásio, epídoto e clinozoisita. A borda de alteração hidrotermal apresenta fraturas subparalelas ao veio preenchidas por minerais opacos, epídoto e plagioclásio. 28

Figura 10: Fotografias mostrando aspecto macroscópico das rochas de amostras de testemunho de sondagem das rochas metavulcânicas intermediárias a máficas. A: Rocha fina, quartzo-feldspática com calcopirita disseminada. B: Rocha leucocrática muito fina com coloração cinzenta, cortada por veio feldspático com sulfetos. C: Estrutura em *stockwork* marcada por delgadas vênulas feldspáticas em rocha fina quartzo-feldspática. 29

Figura 11: Fotomicrografias do grupo das rochas meta-intermediárias e máficas hidrotermalizadas. As fotomicrografias A e B correspondem à lâmina ANDG-03 (2A), a C à

lâmina ANDG-03 (2B), e as D, E e F à lâmina ANDG-03 (10,00 m). A: Bolsão com minerais de alteração hidrotermal na porção esquerda inferior, zonado com núcleo de epidoto, clinozoisita, clorita e plagioclásio e bordas de clorita, plagioclásio e calcita. B: Hornblenda parcialmente substituída por carbonato. C: Vênula de plagioclásio com geminação polissintética, com eixo maior perpendicular às paredes da vênula. D: Cristais subeuédricos de clinozoisita hidrotermais, com algum plagioclásio e carbonato associados. E: Vênula de carbonato com bordas de clorita. F: Veio de opaco com plagioclásio, carbonato, clinozoisita, epidoto e clorita, com bordas marcadas por cristais de plagioclásio com textura comb. 31

Figura 12: Fotomicrografias dos minérios e das rochas hidrotermalizadas associadas. As fotomicrografias A e B correspondem à lâmina AAND-14 (53,15 m), as C e D à lâmina AAND-31 (101,05 m), e as E e F a lâmina AAND-76 (43,70 m). A: Aspecto geral do veio granoblástico de quartzo. Os contatos são predominantemente lobados com domínios de subgrãos muito finos. B: Clinopiroxênio de cor bege, xenomórfico, substituído parcialmente por hornblenda. C: Agregados de cristais de hornblenda com pleocroísmo marrom na brecha de sulfeto, com substituição parcial por hornblenda verde. D: Contato entre hornblenda e minerais opacos marcado pela presença de rutilo e substituição da hornblenda por anfibólio verde-azulado. E: Hábito plumoso dos cristais de hornblenda hidrotermal. F: Cristais subeuédricos de mineral opaco com borda de titanita, em contato com cristais de hornblenda e apatita. 34

Figura 13: Fotografias de amostras de testemunhos de sondagem representativas das mineralizações encontradas no depósito de Cu–Au Antas Norte. A: Brecha de calcopirita com fragmentos de cristais muito grossos de pargasita com borda de alteração para hornblenda. B: Brecha de calcopirita com pirrotita associada e fragmentos de alteração hidrotermal com assembleia mineral com ilmenita, apatita e hornblenda. C: Veio de calcopirita maciça cortada por sistema de vênulas de quartzo com carbonato. D: Veio de calcopirita com estrutura brechóide nas bordas, cortado por vênula de pirrotita. 35

Figura 14: Fotomicrografias representativas do minério de Cu-Au do depósito Antas Norte. A: pirita idiomórfica a subidiomórfica na calcopirita com inclusões na forma de blebs de calcopirita. B: brecha com calcopirita infiltrada nos fragmentos de ganga. 36

Figura 15: Fotomicrografias representativas do minério de Cu-Au do depósito Antas Norte. A: Veio de calcopirita com pirrotita e pirita associada à ganga, com intercrescimento de anfibólio na pirrotita próxima a ganga. Pirrotita com inclusões idiomórficas de magnetita e inclusões xenomórficas de calcopirita. B: Brecha de calcopirita e ganga associada cortadas por vênula descontínua de pirrotita. 36

Figura 16: Fotomicrografias representativas do minério de Cu-Au do depósito Antas Norte. A: Pirita idiomórfica com inclusões na forma de blebs de calcopirita. Pirrotita associada à ganga. B: Pirita marcando o contato entre a ganga e a calcopirita. C: Pirita preenchendo fraturas na calcopirita e na ganga. D: Veio de calcopirita maciça cortado por

vênulas de quartzo e carbonato. Pirita preenchendo fraturas obliquas as vênulas de quartzo.	37
Figura 17: A: Porfiroblasto de pargasita com borda alterada para hornblenda no contato com a calcopirita. B: Cristal zonado de anfibólio, com núcleo de hornblenda e bordas de grunerita. C: Detalhe da alteração (Fe)-Cálcica associada à mineralização, cristais plumosos de hornblenda intercrescidos com apatita. D: Ilmenita inclusa em hornblenda. E: Ilmenita com lamelas como fragmento de brecha de calcopirita. F: Borda de alteração do veio de calcopirita com clorita com textura radiada e intercrescimento de anfibólio na calcopirita e na pirrotita associada.	38
Figura 18: Fotomicrografias das vênulas de quartzo e carbonato na calcopirita. A: Detalhe das linhas de crescimento na vênula marcada por diversas inclusões fluidas, sólidas e gasosas. B: Detalhe da textura <i>comb</i> do quartzo e para domínio interno com subgrãos com contatos lobados. C: Aspecto geral das vênulas com carbonato grosso e quartzo <i>comb</i> . D: Zonamento textural com quartzo <i>comb</i> nas bordas, subgrãos com contatos lobados mais no núcleo e núcleo granoblástico com cristais polygonizados.	40
Figura 19: Características geoquímicas das unidades litológicas, e sua relação com os ambientes tectônicos de formação: (A) e (B) De La Roche <i>et al.</i> (1980); (C) Peccerillo e Taylor (1976); (D) Padrões terras raras normalizados segundo o condrito de Nakamura (1974); (E) e (F) Schandl e Gordon (2002).	42
Figura 20: Relação entre as alterações hidrotermais e a formação dos minerais associados.	47

INTRODUÇÃO

Na Província Mineral de Carajás são conhecidas mineralizações IOCG com idades de 2,70, 2,57 Ga e 1,88 Ga (Tallarico *et al.*, 2005; Réquia *et al.*, 2003; Moreto *et al.*, 2015), formadas em diferentes profundidades e com alterações hidrotermais e características geoquímicas distintas.

A caracterização e distinção das diversas fases de alterações hidrotermais são fundamentais para o entendimento da gênese desse tipo de depósito e serve de ferramenta direta na prospecção de novos alvos para exploração mineral, por meio do reconhecimento dos tipos e dos vetores das alterações associadas às mineralizações.

O depósito de Cu–Au Antas Norte se localiza no município de Curionópolis do estado do Pará (Fig. 1) e geologicamente se insere na Província Mineral de Carajás (PMC) (Fig. 2). Os trabalhos de exploração mineral em desenvolvimento desde 2007 pela empresa *Avanco Resources Ltd* permitiram a delimitação da distribuição espacial do corpo de minérios e de seus teores por 110 sondagens rotativas diamantadas. Entretanto, a gênese do depósito ainda não foi estudada, mas os levantamentos geológicos desenvolvidos durante a fase de exploração mineral sugerem que a mineralização seja do tipo Óxido de Ferro–Cobre–Ouro ou IOCG (*Iron Oxide–Cooper–Gold*), segundo a concepção de Hitzman *et al.* (1992) e Willians *et al.* (2005), apesar de algumas características incomuns, como a presença de ilmenita abundante ao invés da típica magnetita ou hematita presentes nestes tipos de depósitos.

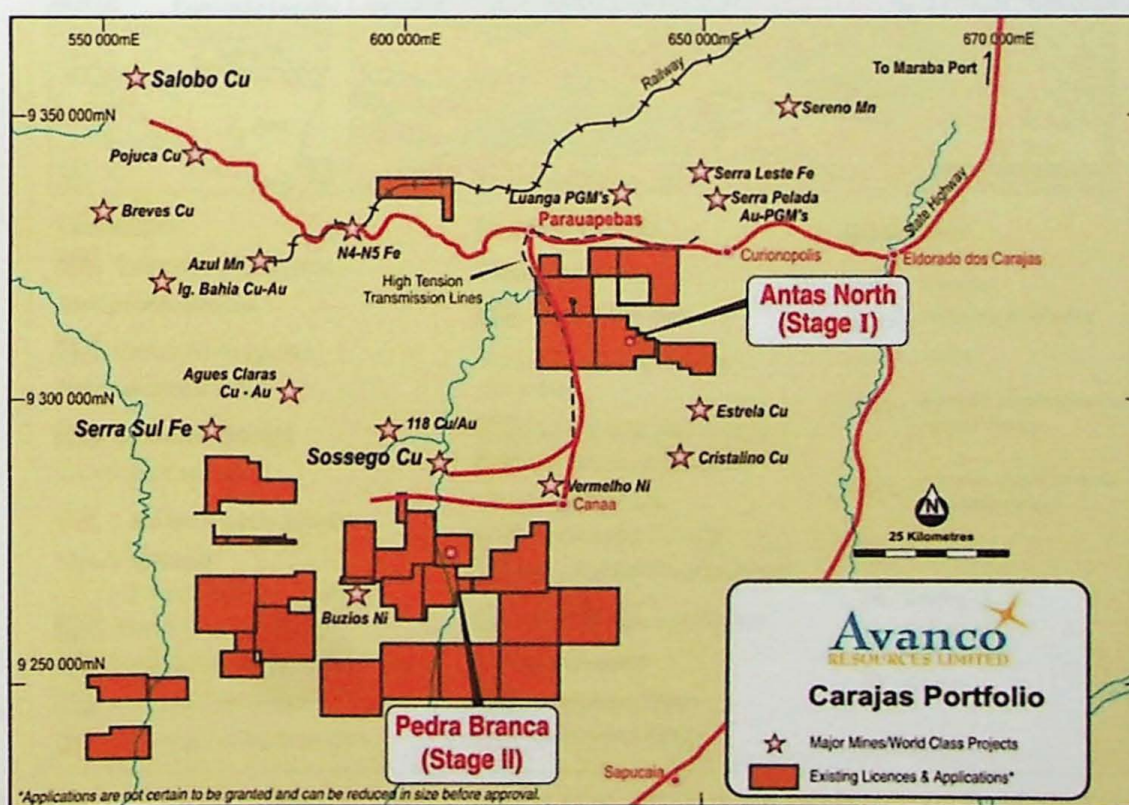


Figura 1: Localização da Mina Antas Norte e das áreas de pesquisa da *Avanco Resources Ltd.* (<http://www.avancoresources.com/content/projects/antas-north>).

Os depósitos de IOCG descritos na PMC apresentam algumas características em comum, como discutido por Monteiro *et al.* (2008), sendo elas a natureza das rochas hospedeiras (todos os depósitos estão hospedados nas unidades do Supergrupo Itacaiúnas); relação espacial com zonas de cisalhamento e com intrusões de diferentes composições; intensa alteração hidrotermal, com alteração sódica inicial que evolui para alteração potássica tardia e, por fim, a mineralização em sulfetos.

O estudo proposto visa caracterizar os eventos hidrotermais e de mineralização do depósito Antas Norte, fundamentado em petrografia e geoquímica das rochas encaixantes da mineralização, rochas hidrotermalizadas e dos minérios, para um melhor entendimento da gênese do depósito, comparativamente aos depósitos já estudados na PMC (Monteiro *et al.*, 2008; Moreto *et al.*, 2015).

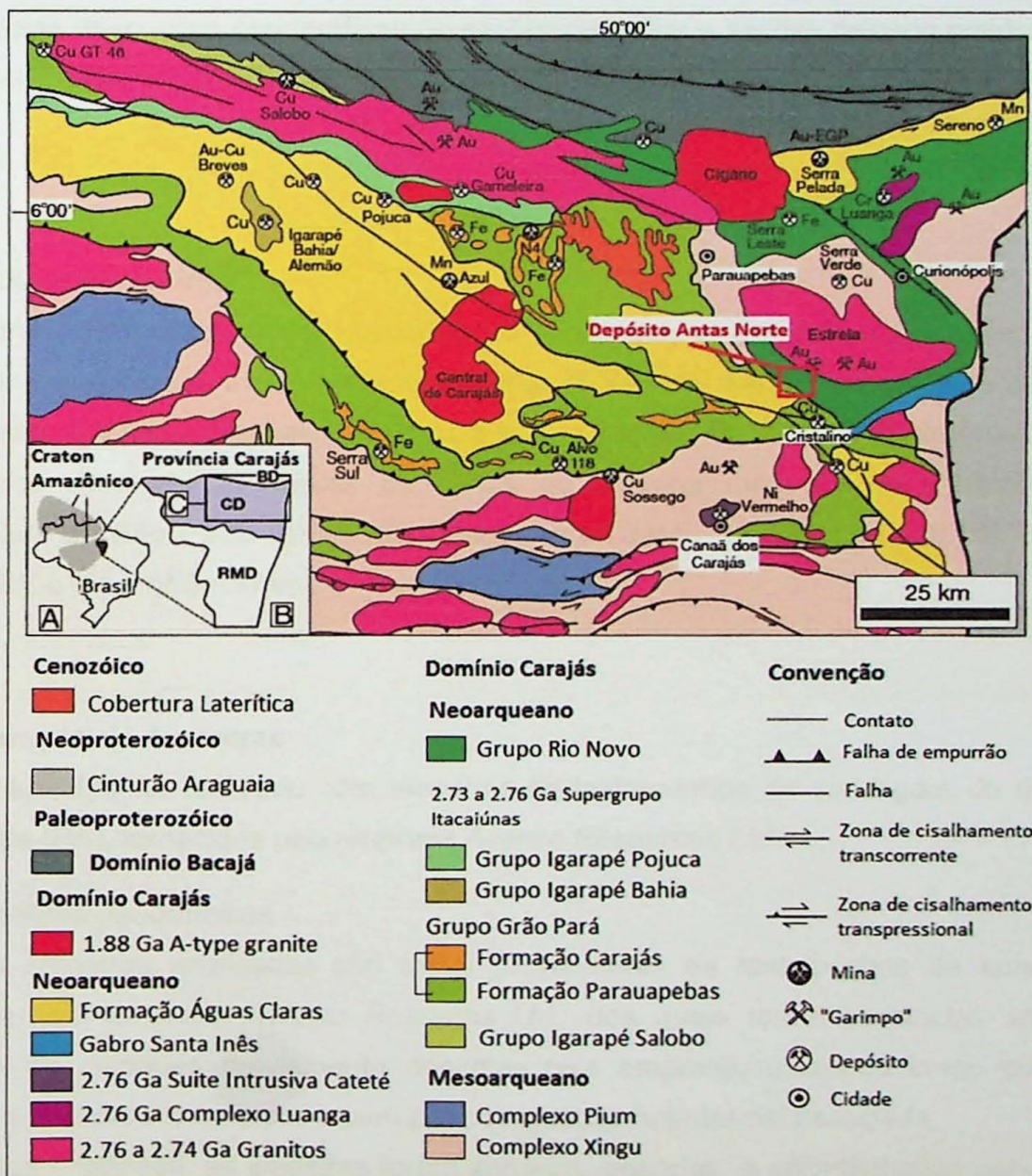


Figura 2: Mapa Geológico do Domínio Carajás (Xavier *et al.*, 2012) e sua localização na Província Carajás, com a área do depósito Antas Norte assinalada no quadrado vermelho.

1. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho de formatura foi a caracterização petrográfica das rochas hospedeiras e hidrotermalizadas e sua comparação com os tipos de alteração hidrotermal presentes nos depósitos IOCG da Província Mineral de Carajás, possibilitando assim definir se o depósitos Antas Norte pode ser classificado geneticamente como do tipo IOCG.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma vez que as amostras para este estudo já haviam sido coletadas pelo geólogo da *Avanco Resources Ltd.* Fábio Brentan, o trabalho de formatura foi realizado em quatro etapas principais, iniciada com a preparação de amostras para a petrografia e geoquímica, seguida pelas descrições petrográficas de seções delgadas e seções delgado-polidas e, por último, das análises geoquímicas, com a revisão bibliográfica concomitante com todas as etapas.

2.1 Revisão Bibliográfica

Foram compilados artigos, dissertações, teses, mapas e trabalhos apresentados em simpósios e congressos existentes sobre a área de estudo, bem como de mineralizações semelhantes. A busca das referências para essa pesquisa foi feita na Biblioteca do IGC-USP e nos sistemas de buscas de dados do Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade de São Paulo (SIBi/USP), que inclui as bases de dados DEDALUS, SciELO, ERL, ProBE e *Web of Science*, e no Portal CAPES.

2.2 Preparação de Amostras

O trabalho foi realizado com amostras de testemunhos de sondagem do depósito Antas Norte (PA), fornecidas pela empresa *Avanco Resources Ltd.*

2.2.1 Análises geoquímicas

As amostras analisadas são todas provenientes de testemunhos de sondagens fornecidos pela empresa *Avanco Resources Ltd.*, dos quais foram escolhidas amostras referentes às unidades previamente descritas pela empresa, utilizando como critério a seleção de amostras isotrópicas e com pouca alteração hidrotermal associada.

Após a seleção, as amostras foram serradas, pesadas, e encaminhadas para o LTA (Laboratório de Tratamento de Amostras) do IGC-USP, onde foram britadas em britador de mandíbulas e moídas em panela de ágata até ~ 200 mesh, e em seguida encaminhadas para o Laboratório ALS, onde foram feitas as por ICP-MS.

2.2.2 Seções Delgadas e Seções Delgado-Polidas

As amostras utilizadas na petrografia são também dos testemunhos de sondagens fornecidos pela empresa *Avanco Resorces Ltd.*. Para estes estudos foram selecionadas amostras inalteradas a pouco alteradas visando a caracterização dos protólitos e amostras de rochas com as principais variedades de alterações hidrotermais, visando a definição do tipo e da gênese da mineralização. Esta seleção foi feita após detalhada descrição macroscópica das amostras.

Após a seleção, as amostras foram encaminhadas para a seção de laminação do IGC-USP, onde foram confeccionadas 20 seções delgadas com lamínula.

Além destas lâminas, foram utilizadas doze seções delgado-polidas e 26 seções delgadas, previamente confeccionadas.

2.3 Petrografia

As descrições petrográficas foram feitas no Laboratório Didático de Microscopia Petrográfica (LDMP), utilizando microscópios petrográficos binoculares Olympus BXP 40 com acessório para análise por luz polarizada refletida, visando à caracterização mineralógica, textural e estrutural dos litotipos, bem como da alteração hidrotermal e mineralizações associadas.

As fotomicrografias foram feitas no LabPetro (Laboratório de Petrografia Sedimentar), nos microscópios Leica DM750 P e AX2, utilizando o *software* LAS.

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.1 Depósitos de Óxido de Ferro–Cobre–Ouro (IOCG)

Os depósitos de Óxido de Ferro–Cobre–Ouro, definidos pela primeira vez por Hitzman *et al.* (1992), consistem numa classe de depósitos com algumas características distintas, como discutido por Williams *et al.* (2005). Cinco destas características são apresentadas como diagnósticas para esses depósitos, sendo elas: (1) cobre, com ou sem ouro, como principal metal para aproveitamento econômico; (2) minério hidrotermal e forte controle estrutural na formação dos corpos de minérios; (3) ocorrência de magnetita e/ou hematita abundantes; (4) óxidos de ferro com razões de Fe/Ti relativamente maiores que aquelas encontradas na maioria das rochas ígneas e da composição média da crosta; (5) depósitos sem relações claras com intrusões ígneas, como as apresentadas em outros depósitos (*e.g.* *skarns* e pórfiros).

São inúmeros os sistemas hidrotermais com características relacionadas aos IOCGs no mundo, os quais apresentam grande distribuição espacial e temporal. Apesar de sua ocorrência em todos os continentes e de sua distribuição desde o presente até o

Neoarqueano, os depósitos economicamente interessantes são incomuns e restritos a poucas regiões (Williams *et al.*, 2005).

A PMC se destaca por ter um grande número de depósitos de IOCG importantes, como citado em Xavier *et al.* (2012) e Monteiro *et al.* (2014). Os depósitos de IOCG no setor norte e sul do Domínio Carajás apresentam controle estrutural definido por uma zona de cisalhamento rúptil-dúctil regional, com mergulhos altos, que define o contato entre as unidades metavulcanossedimentares do Supergrupo Itacaiúnas (ca. 2,76–2,73Ga) e o embasamento mesoarqueano (3,0–2,83 Ga) (Xavier *et al.*, 2012).

Os depósitos de IOCG do sul da PMC apresentam algumas características em comum, como caracterizado por Monteiro *et al.* (2008), sendo elas: a natureza das rochas hospedeiras, com todos os depósitos nas unidades do Supergrupo Itacaiúnas; a relação espacial com zonas de cisalhamento e intrusões de diferentes composições; intensa alteração hidrotermal, com alteração sódica inicial e alteração potássica tardia e, finalmente, a mineralização dos sulfetos; e inclusões fluidas nos minerais associados ao minério com temperaturas de homogeneização variadas entre 100–570 °C e com salinidades de 0 a 69 wt% NaCl eq. (Monteiro *et al.*, 2008).

3.1.2 Província Mineral de Carajás

A Província Mineral de Carajás (PMC) constitui uma das províncias minerais mais produtivas no mundo, hospedando diversos depósitos minerais de ferro, manganês, ouro, cromo e EGP, dentre outros, além de conter numerosos depósitos atribuídos à classe de depósitos de Óxido de Ferro-Cobre-Ouro (IOCG) (Monteiro *et al.*, 2008; Moreto *et al.*, 2011, Moreto *et al.*, 2015).

A PMC é formada por um bloco arqueano dividido em dois domínios tectônicos, o domínio Carajás ao norte e o domínio Rio Maria ao sul (Xavier *et al.*, 2012). O domínio Carajás é constituído por um embasamento mesoarqueano, previamente denominado Complexo Xingu, composto de gnaisses tonalíticos a trondhjemiticos e migmatitos, e o Complexo Pium, com ortogranulitos máficos e félsicos. Estudos recentes sugerem a individualização de unidades mesoarqueanas no Complexo Xingu, entre elas o Tonalito Bacaba e o Granito Sequeirinho, de idade 3,0 Ga (Moreto *et al.*, 2011); Granito Canaã dos Carajás, com idades de 2,96–2,93 Ga (Feio, 2011); Trondhjemitito Rio Verde e os granitos predominantemente cálcio-alcalinos Bom Jesus, Cruzadão e Serra Dourada, de idades 2,87–2,83 Ga (Moreto *et al.*, 2011). No complexo Pium também foram individualizados corpos de rochas ígneas sob a denominação Diopsídio Norito Pium, composto por noritos, gabros e dioritos, maciços e foliados, e o Ortogranulito Chicrim-Cateté, constituído por ortogranulitos, enderbitos e charnockitos (Monteiro *et al.*, 2014).

Sobrepõem-se ao embasamento os *greenstone belts* neoarqueanos da Bacia de Carajás, representadas pelo grupo Grupo Rio Novo e pelo Supergrupo Itacaiúnas, e a Formação Águas Claras, formada em uma bacia cratônica plataformar neoarqueana depositada sobre os *greenstone belts* neoarqueanos da Serra dos Carajás (Vasquez e Rosa-Costa, 2008).

Além do embasamento mesoarqueano e das unidades metavulcanossedimentares da Bacia de Carajás, uma série de unidades intrusivas são reconhecidas na região. Dentre elas podem ser citados os corpos máficos–ultramáficos acamados do Complexo Luanga (Vasquez e Rosa-Costa, 2008) que, segundo datações feitas por Machado *et al.* (1991), tem idade de 2,76 Ga, indicando contemporaneidade com os *greenstone belts* neoarqueanos da região. Ainda contemporâneos aos *greenstone belts*, segundo as idades de 2,76–2,73 Ga obtidas por Vasquez e Rosa-Costa (2008), ocorrem corpos intrusivos de granitos de alto potássio, reconhecidos como granitos Estrela, Plaquê, Planalto, Serra do Rabo e Igarapé Gelado, os quais indicam um intenso magmatismo granítico subalcalino do tipo A e cálcio-alcalino (Vasquez e Rosa-Costa, 2008). Machado *et al.* (1991) descrevem um magmatismo paleoproterozóico com granitos anorogênicos (tipos A e I) representados pelo Granito Novo Salobo (*New Salobo Granite*), Granito Cigano e Granito Carajás (Machado *et al.*, 1991).

3.1.3 Supergrupo Itacaiúnas

Esse supergrupo representa a sequência vulcano-sedimentar neoarqueana do tipo *greenstone belt* que compõe a Bacia Carajás.

O Supergrupo Itacaiúnas aflora em discordância sobre o Complexo Xingu (Machado *et al.*, 1991) e é sobreposto em discordância angular pela Formação Águas Claras (Melo *et al.*, 2014).

O Supergrupo Itacaiúnas é constituído por quatro unidades, segundo a divisão proposta pela DOCEGEO (1988), sendo a mais antiga o Grupo Igarapé Salobo, seguida pelo Grupo Grão Pará, Grupo Igarapé Bahia e Igarapé Pojuca. Segundo Melo *et al.* (2014) todos os grupos citados hospedam depósitos do tipo IOCG, como por exemplo o Depósito de Salobo no Grupo Igarapé Salobo, o depósito de Gameleira no Grupo Igarapé Pojuca, o depósito aqui estudado, o Antas Norte, no Grupo Grão Pará, e o Grupo Igarapé Bahia com o depósito de Igarapé Bahia–Alemão.

3.1.4 O Depósito Antas Norte

O depósito ocorre a sul do Granito Estrela (Fig. 1) e é hospedado na sequência metavulcanossedimentar do Supergrupo Itacaiúnas (Fig. 4). A norte do depósito afloram vulcânicas máficas hidrotermalizadas com escapolita e biotita, e a sul vulcânicas félsicas

hidrotermalizadas, com sericita e quartzo abundantes. Diques máficos de espessuras variáveis, com orientação NE–SW, são comuns.

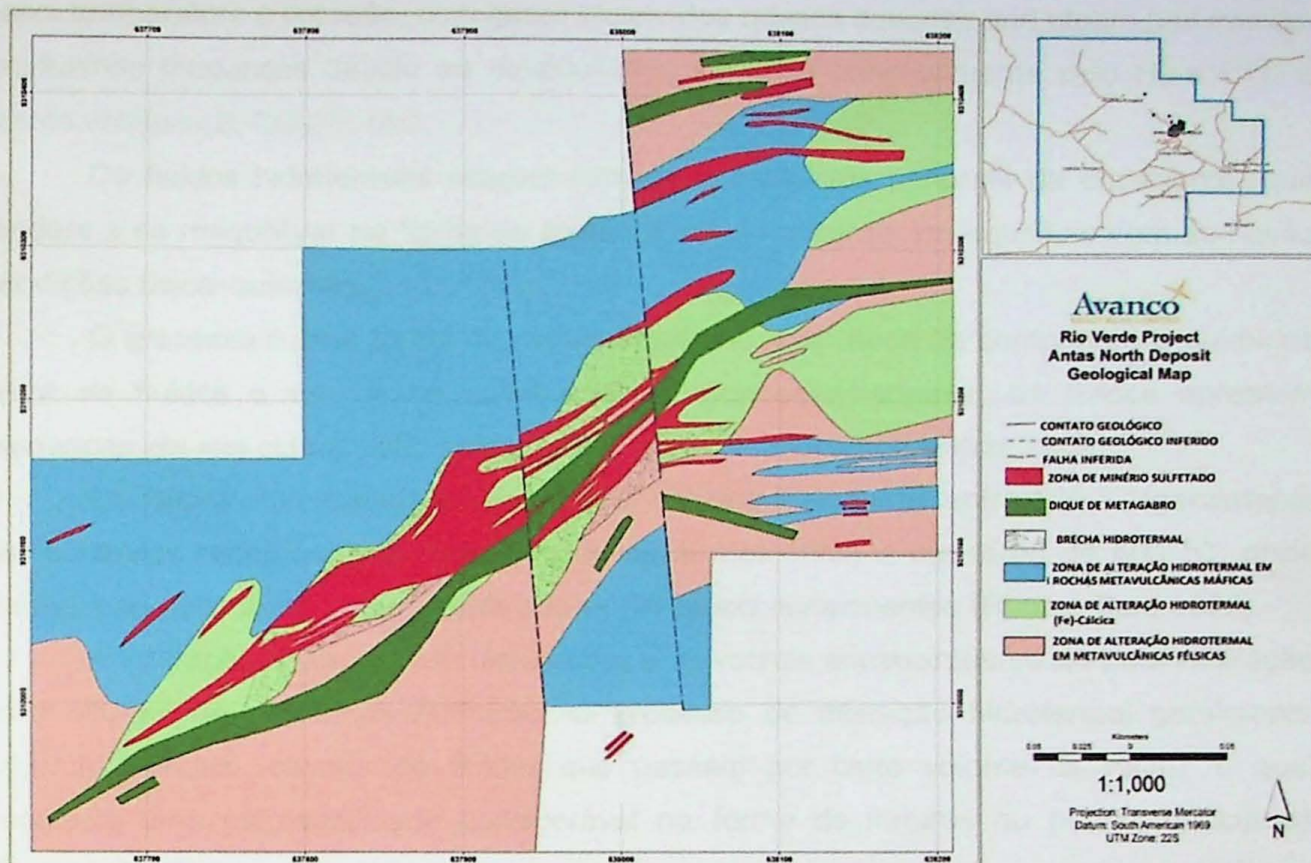


Figura 3: Mapa geológico do depósito Antas do Norte elaborado pela Avanco Resources Ltd. (<http://www.avancoresources.com/content/projects/antas-north>).

O corpo de minério hospeda-se predominantemente em brechas hidrotermais com anfibólio e quartzo como principais minerais de alteração hidrotermal. O minério é constituído por calcopirita predominante, com pirrotita subordinada, rara pirita e, por vezes, esfalerita, além de quantidades variadas de apatita e ilmenita.

As zonas de alteração hidrotermal do depósito de Antas Norte são semelhantes às reconhecidas em outros depósitos do tipo IOCG na PMC. Os corpos de minério se associam a rochas com alteração sódica regional (com formação de albita e escapolita), seguida por alteração potássica (predominantemente com biotita) e alteração cálcica (com actinolita–cummingtonita). A última fase de alteração hidrotermal resultou na cristalização de ilmenita e apatita e na mineralização em cobre e ouro. Alteração carbonática representa uma fase tardia no depósito.

3.1.5 Alterações Hidrotermais

A alteração hidrotermal é produto da interação entre rochas e fluidos aquosos quentes sob condições físico–químicas específicas que resultam em processos complexos envolvendo alterações na mineralogia, química e textura da rocha.

A alteração hidrotermal pode ocorrer sobre condições magmáticas, no estágio *subsolidus*, com a infiltração de fluidos supercríticos na massa rochosa, até condições de baixa temperatura e pressão, com gases exsolvidos e fases aquosas que atuam nas rochas, produzindo mudanças devido ao desequilíbrio, causado principalmente pelo H^+ e OH^- e outros voláteis (B, CO_2 , F, etc).

Os fluidos hidrotermais reagem com os constituintes minerais da encaixante, que tendem a se reequilibrar na forma de assembleias de minerais em equilíbrio com as novas condições físico-químicas.

O processo é uma forma de metassomatismo, com troca de componentes químicos entre os fluidos e as rochas encaixantes e, conseqüentemente, os fluidos aprestam mudanças em sua composição como resultado dessa interação (Pirajno, 2009).

Os fluidos hidrotermais podem ocorrer sobre temperaturas entre 100 °C (geralmente em contextos relacionado à circulação de água meteórica) e em torno de 600 °C, onde fluidos magmáticos em profundidade são os principais componentes (Rose e Burt, 1979).

A interação entre o fluido hidrotermal e as rochas encaixantes se dá pela infiltração e/ou difusão de elementos químicos. O processo de alteração hidrotermal geralmente envolve grandes volumes de fluidos que passam por certo volume de rocha, o qual necessita uma permeabilidade considerável na forma de fraturas ou poros conectados (Pirajno, 2009).

Segundo Pirajno (2009), os principais fatores na alteração hidrotermal são: (1) a natureza das rochas encaixantes; (2) composição dos fluidos envolvidos; (3) concentração, atividade e potencial químico dos componentes dos fluidos (tais como H^+ , CO_2 , O_2 , K^+ , H_2S , SO_2 , etc).

Na PMC tem sido reconhecidos diversos tipos de alterações hidrotermais, incluindo alteração sódica, sódica-cálcica e potássica, além de cloritização, turmalinização e silicificação (Monteiro *et al.*, 2008). A seguir são expostos alguns tipos de alteração e o modo de ocorrência em depósitos da PMC, segundo Monteiro *et al.* (2008).

Alteração Sódica: presente nos depósitos Sequeirinho–Pista–Baiano, esta alteração sódica apresenta forte controle regional nas zonas de cisalhamento dúctil-rúpteis, sendo a alteração comumente pervasiva, porém controlada por fraturas. Esta alteração resulta na precipitação de albita granular, fina a média, com inclusões de hematita extremamente finas que imprimem uma coloração rósea às rochas alteradas. A albita apresenta comumente textura de tabuleiro de xadrez e exibe extinção ondulante. Texturas de recristalização por migração de limites de bordas indicam que a albita se formou antes e durante a deformação. Escapolita e turmalina são comuns nesta zona de alteração.

Alteração Sódico-Cálcica: Nos depósitos de Sequeirinho–Pista–Baiano esta alteração é reconhecida quando se aproxima das zonas mineralizadas. É controlada por fraturas, mas se torna pervasiva em rochas milonitizadas. A assembleia mineral comum a

essa alteração é definida pela actinolita e albita com magnetita, calcita, epidoto, quartzo, titanita, allanita e thorianita. No corpo Sequeirinho, essa alteração se associa a corpos com magnetita, localmente intercrescida com a apatita.

No depósito Sossego–Curral são descritos raros clastos de zonas de alteração com actinolita–albita–magnetita–apatita, localizados principalmente em brechas de minério.

Alteração Potássica: Ocorre nos depósitos de Sequeirinho–Pista-Baiano, as zonas de alteração potássica são representadas por duas assembleias minerais. A primeira, controlada por estruturas, forma veios com feldspato potássico, biotita, quartzo, magnetita e, em menor quantidade, allanita, thorianita e calcopirita. Nesta zona de alteração a albita hidrotermal é substituída por feldspato potássico e a actinolita é substituída por biotita. Gabros com alteração sódico–cálcica podem apresentar substituição de hastingsita hidrotermal por biotita e pirrotita. Outra assembleia da alteração potássica é representada por biotita ± hastingsita +turmalina + escapolita.

No depósito de Sossego–Curral a alteração potássica varia de pervasiva nas proximidades das zonas mineralizadas para controlada por fissuras em porções mais distais. A alteração potássica mais intensa nesse depósito é a biotitização pervasiva com magnetita associada, que grada externamente ao foco hidrotermal para zonas ricas em clorita e magnetita.

Cloritização: Nos depósitos de Sossego–Curral as rochas com alteração potássica são cortadas por veios de clorita e possuem zonas cloritizadas. Essa alteração é bem desenvolvida no Sossego–Curral, onde forma um extenso envelope no entorno da área com alteração potássica. Este estilo de alteração resultou na formação de veios de clorita e calcita com quartzo, titanita, rutilo e magnetita subordinados, e zonas de cloritização pervasivas, onde a biotita é substituída por clorita rica em ferro. Veios de calcita ocorrem mais frequentemente próximos a zonas mineralizadas. Esses veios contêm apatita, albita, epidoto e muscovita subordinados.

Tabela 1 – Tabela com relação entre depósitos da PMC, alterações hidrotermais e rochas hospedeiras. Modificada de Monteiro *et al.* (2008).

Depósito	Rochas hospedeiras	Alterações hidrotermais
Sossego	Granito, metavulcânica félsica, granito granofírico, gabro	Alteração sódica, sódico–cálcica, potássica, cloritização, carbonatização
Salobo	Metadacitos, anfibolitos, metagrauvacas, formações ferríferas	Alteração sódica, potássica e ferro–potássica (Kfs; Bt; Gr; Fa; Alm; All; Mag; Hast; Tur; Zr); propilitica
Igarapé Bahia/ Alemão	Metavulcânica,	cloritização;

	metavulcanoclástica, metassedimentar, BIFs	turmalinização; Alteração potássica (Fe); Carbonatização; alteração sódico- cálcica
Gameleira	Metavulcânica máficas a intermediárias, bt- xistos ,BIFs	Alteração potássica (Bt; Alm; Qtz; Ab; Tur; Ti; Ilm; Mag; Scp; Ap; Uran)
Alvo 118	Metavulcânicas máficas e metavulcânicas piroclásticas, BIFs	Alteração potássica, cloritização, silicificação, carbonatização
Cristalino	Metavulcânica intermediária a félsica, formação ferrífera	Alteração potássica, alteração sódico- ferríca, cloritização, carbonatização

Ab = albita, All = allanita, Alm = almandina, Ap = apatita, Bt = biotita, Fa = fayalita, Gr = grafite, Hast = hastingsita, Ilm = ilmenita, Kfs = feldspato potássico, Qtz = quartzo, Kfs = feldspato potássico, Mag = magnetita, Scp = escapolita, Ti = titanita, Tur = turmalina, Uran = uraninita, Zr = zircão.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Caracterização das Unidades Petrográficas

4.1.1 Rochas Metavulcânicas Máficas Hidrotermalizadas

As metavulcânicas máficas têm granulação fina a média, cor cinza-esverdeado, textura predominantemente granoblástica e estrutura maciça (Fig. 4B) ou xistosa. O índice de cor varia de 35% a 50%. Pode apresentar porções arredondadas com até 3 cm de diâmetro compostas por cristais mais grossos de anfibólio e feldspato, interpretados como xenólitos do protólito ígneo. Nas porções associadas ao sulfeto a rocha adquire tons esverdeados (Fig. 4A) e apresenta cristais grossos de apatita e hornblenda (Fig. 4C).

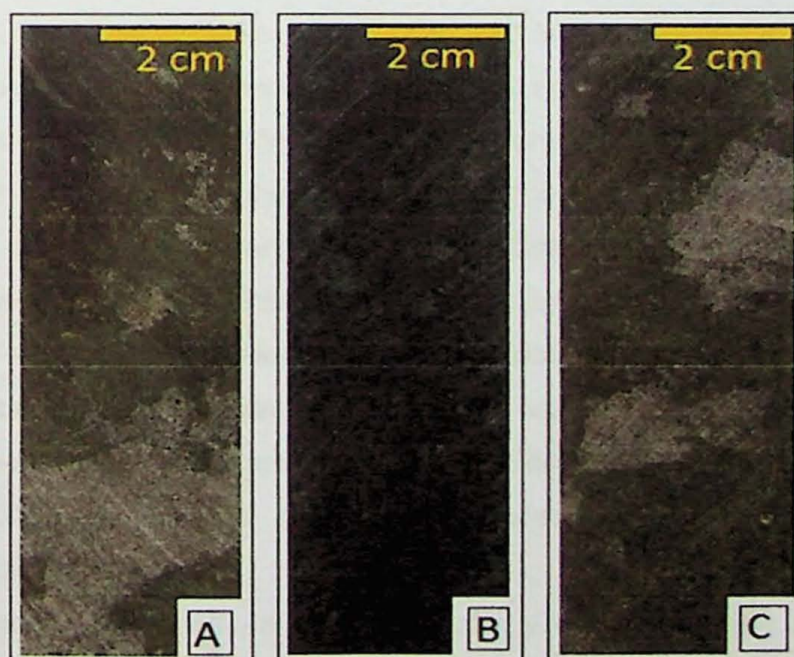


Figura 4: Fotografias de amostras de testemunho de sondagem da unidade das rochas metavulcânicas máficas hidrotermalizadas, mostrando aspecto macroscópico das rochas. A: Apatita-hornblenda anfibólito grosso com

brecha de calcopirita na porção superior esquerda da foto. B: Aspecto geral da metavulcânica máfica pouco alterada. C: Rocha hidrotermalizada com apatita grossa e hornblenda verde relacionada à mineralização de calcopirita.

A principal alteração hidrotermal se associa a zonas com veios e vênulas de calcopirita, porções brechadas de sulfetos ou com calcopirita disseminada. As partes alteradas apresentam cor verde-claro com variações para cinza-claro e são constituídas por anfibólio e apatita de granulação média. Alguns veios de calcopirita com cristais grossos de anfibólios têm carbonatos associados. Vênulas e brechas de carbonato são comuns.

Os litotipos característicos desta unidade são biotita-hornblenda-quartzo xistos e hornblenda-tremolita-clorita-biotita-quartzo xistos porfiroclásticos com turmalina.

O biotita-hornblenda-quartzo xisto apresenta textura granoblástica e bandamento composicional discreto (Fig. 5F) concordante com a xistosidade. A rocha é inequigranular de granulação fina a média, com leitos nematoblásticos compostos predominantemente por hornblenda, leitos ou agregados arredondados granoblásticos de quartzo e leitos lepidonematoblásticos de hornblenda e biotita. A xistosidade é cortada obliquamente por vênulas, com espessura mínima de 1 mm e máxima de 2 mm. As vênulas apresentam textura granoblástica, com minerais com granulação variando de 0,03 mm a 1 mm e composições semelhantes, sendo a primeira composta por plagioclásio + hornblenda + calcita com epidoto e clorita como acessórios, e a segunda vênula com plagioclásio + hornblenda + calcita com biotita, clorita e apatita subordinados. O quartzo ocorre em leitos com texturas granoblásticas e em agregados ovalados levemente estirados na foliação, com granulação entre 0,01 mm e 0,1 mm, com contatos poligonais sobrepostos por lobados. A hornblenda ocorre como cristais idioblásticos orientados na foliação, que podem apresentar extinção ondulante e, em algumas porções da lâmina, estão substituídos por biotita, que em parte é alterada para clorita com leucoxênio nos planos de clivagens. Minerais opacos ocorrem associados à hornblenda, seja como inclusões ou como cristais xenomórficos ao redor.

Nas vênulas, a calcita (Fig 5E) é o mineral em maior volume, formando cristais xenomórficos de até 1 mm de comprimento. A clorita ocorre principalmente nas bordas das vênulas ou como inclusões no carbonato. A hornblenda pode ocorrer idiomórfica ou xenomórfica e pode estar parcialmente substituída por biotita. O plagioclásio, caracterizado opticamente como oligoclásio, apresenta geminação polissintética descontínua e extinção ondulante. A apatita compõe agregados idiomórficos com granulação variando entre 0,05 mm e 0,1 mm. As vênulas apresentam fraturas preenchidas por carbonato, clorita e titanita. Nas porções próximas às vênulas a encaixante apresenta epidoto e clinozoisita com inclusões de minerais opacos.

O hornblenda-tremolita-clorita-biotita-quartzo xisto apresenta estrutura maciça, textura porfiroclástica marcada por porfiroclastos de tremolita com até 5 mm de comprimento, granulação de 0,05 mm a 0,4 mm e matriz granoblástica quartzo-feldspática

com biotita, clorita e hornblenda. Sobrecrecimentos de turmalina idiomórfica marrom-azulada foram observados em alguns cristais de anfibólio.

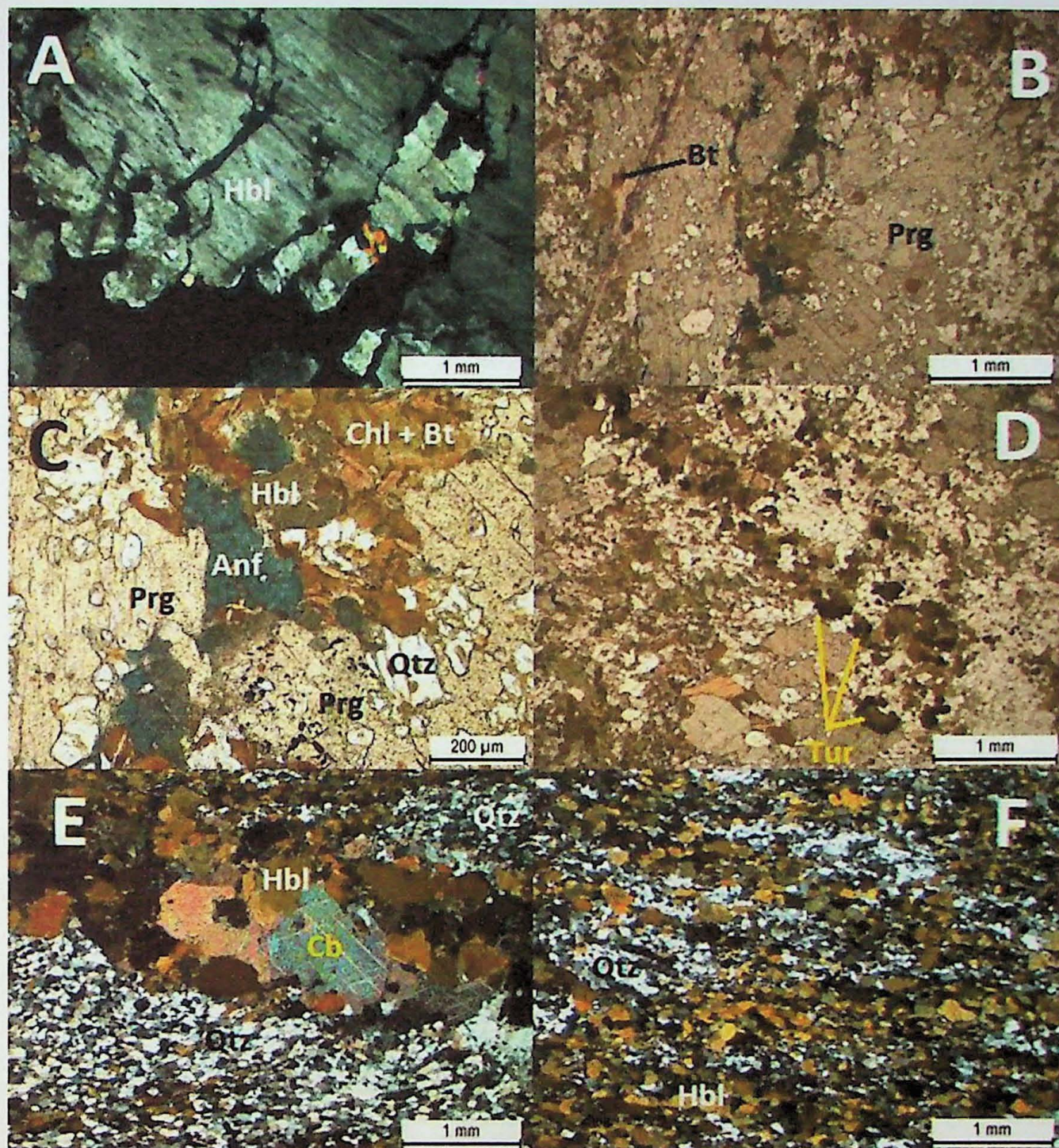


Figura 5: Texturas e, composições mineralógicas representativas das rochas metavulcânicas máficas hidrotermalizadas, onde a fotomicrografia A correspondente à lâmina AAND-57A, as B, C e D à lâmina AANQ-40 (115,95 m), e as fotomicrografias E e F à lâmina ANDG-01 (40,10 m). A: Borda de alteração do veio de sulfeto brechado e com fraturas preenchidas por sulfetos. B: Porfiroclastos de clinoanfibólio incolor com inclusões arredondadas de quartzo. C: Alteração do clinoanfibólio para hornblenda verde, biotita parcialmente substituída por clorita e anfibólio azul. D: Vênula de turmalina idiomórfica marrom-azulada. E: Vênula oblíqua a foliação, preenchidas por clorita, plagioclásio, calcita e hornblenda, com apatita em menor volume. F: Aspecto geral do hornblenda-quartzo xisto com biotita, onde também pode ser observada uma foliação oblíqua à foliação predominante.

A tremolita porfiroclástica (Fig. 5B) apresenta bordas com texturas de dissolução, diversas inclusões arredondadas de quartzo e está parcialmente substituída nas bordas por biotita. Uma alteração estritamente relacionada com os porfiroclastos é a substituição da

tremolita por anfibólio azulado (Fig. 5C) e/ou por hornblenda com pleocroísmo verde-escuro, ambos, por vezes, parcialmente substituídos por biotita. Essa alteração hidrotermal se associa às vênulas de turmalina que, por vezes, corta os porfiroclastos de modo que a turmalina ocorre também como inclusões. A biotita é idiomórfica, estando presente na matriz ou substituindo os anfibólios e é, por sua vez, substituída parcialmente por clorita. A clorita que substitui a biotita forma cristais xenomórficos com restos de biotita. O quartzo compõe agregados de grãos poligonizados com granulação média de 0,05 mm, onde predominam os contatos retos e, em algumas porções, contatos lobados. O feldspato não apresenta geminação polissintética, exibe extinção ondulante, leve zonamento composicional e forte saussuritização.

Dos minerais relacionados à vênula (Fig. 5D), a turmalina constitui cristais prismáticos de até 0,8 mm de comprimento, enquanto o anfibólio possui pleocroísmo forte variando de marrom-azulado a marrom-escuro. Anfibólio azulado xenomórfico ocorre em pequenos volumes associado aos porfiroclastos ou como produto da alteração dos mesmos.

4.1.2 Rochas Metavulcânicas Félsicas Hidrotermalizadas

Estas rochas são leucocráticas, com índice de cor variando entre 3% e 5%, granoblásticas, têm granulação fina, estrutura maciça ou com vênulas dobradas (Fig. 6A) e cor variando de cinza-claro a bege-claro ou rosa (Fig. 6B). A composição é predominantemente quartzo-feldspática e são comuns porções silicificadas, onde a rocha adquire tons mais acinzentados, enquanto que as cores tendem a rosa quando aumenta o teor de feldspatos.

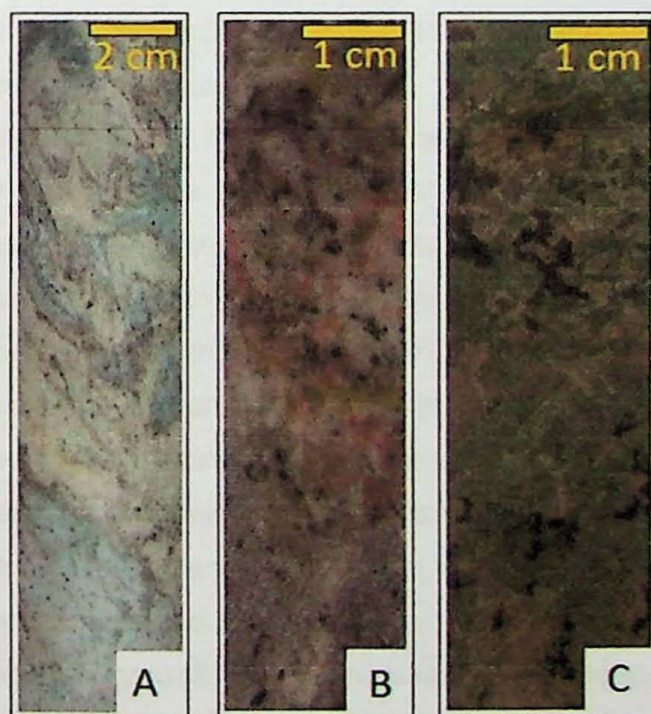


Figura 6: Fotografias de amostras de testemunho de sondagem da unidade das rochas metavulcânicas félsicas hidrotermalizadas, mostrando aspecto macroscópico das rochas. A: Rocha leucocrática com bandas quartzosas (azuladas) e bandas quartzo-feldspáticas (brancas), com uma dobra no bandamento descontínuo. B: Rocha fina

de coloração rósea devido ao feldspato hidrotemal, com epidoto (amarelo) e minerais opacos associados. C: Rocha félsica com alteração hidrotermal avançada associada a porções mineralizadas que resultou na forma cristalização de feldspato, anfibólio, apatita e ilmenita.

São frequentes vênulas e pequenos bolsões de minerais hidrotermais de cor rosa-avermelhados ricos em feldspato e algumas porções apresentam cristais finos de epidoto disseminados.

As rochas metavulcânicas félsicas hidrotermalizadas apresentam dois domínios composicionais principais. Um delas correspondente a uma metavulcânica leucocrática com assembleia mineral dominante de quartzo + oligoclásio + carbonato + ilmenita, com alteração hidrotermal em bolsões com assembleia mineral de oligoclásio + carbonato + clorita + clinozoizita com apatita, minerais opacos e zircão subordinados. A outra parte correspondente a uma metavulcânica com hornblenda, apresentando como assembleia mineral dominante plagioclásio + quartzo + carbonato + clinozoizita + hornblenda, com allanita, ilmenita e zircão subordinados.

As metavulcânicas leucocráticas são maciças, equigranulares e de granulação fina. A composição é quartzo-feldspática e a textura granoblástica. Os cristais de quartzo e de feldspatos apresentam contatos lobados, podendo ocorrer subgrãos nas bordas. Os feldspatos se apresentam em duas formas distintas: como cristais límpidos subidiomórficos com geminação polissintética descontínua, ou com aspecto turvo, sericitizados e xenomórficos. A rocha é cortada por vênulas irregulares e descontínuas, com espessura máxima de 1,5 mm, compostas principalmente por oligoclásio com geminação polissintética perpendicular à orientação da vênula, indicando uma cristalização em uma estrutura de abertura e preenchimento. Associados ao oligoclásio ocorrem cristais xenomórficos de carbonato e, em algumas porções, observa-se um zonamento, com o carbonato principalmente nas bordas da vênula. Minerais opacos também se associam aos carbonatos (Fig. 7A) e estes apresentam fina borda de titanita. Clorita está presente de forma subordinada nas vênulas e geralmente está associada aos minerais opacos.

Em contato interdigitado com a metavulcânica leucocrática (Fig. 7B) ocorre um bolsão feldspático inequigranular hidrotermal (Fig. 7C) com grãos de granulação média a grossa, constituído principalmente por oligoclásio, carbonato, clorita e clinozoisita, além de sericita, minerais opacos, apatita e zircão em menor volume. O oligoclásio, que representa cerca de 80% dos minerais nesse bolsão, apresenta variação granulométrica de 0,3 mm a 0,6 mm, contatos lobados com um padrão amebóide, geminação polissintética descontínua, aspecto túrbido e forte seritização, com formação de sericita idiomórfica em arranjo radiado predominante. Uma segunda geração de plagioclásio é observada na forma de cristais límpidos porfiroblásticos de albita, geralmente associados ao carbonato e com inclusões de carbonato e clorita. Este apresenta geminação polissintética descontínua e ausência de

sericitização. O carbonato ocorre na forma de cristais geralmente grossos, xenomórficos e, em alguns casos, poiquiloblásticos e com muitas inclusões de plagioclásio com texturas de dissolução nas bordas. A clorita pode ocorrer como cristais grossos com leucoxênio e minerais opacos nas clivagens e nas bordas, representando possivelmente pseudomorfos de biotita. Também forma cristais idiomórficos finos em arranjos radiados (Fig. 7D) associados ao carbonato e à sericita. A clinozoisita constitui cristais finos xenomórficos disseminados no bolsão, às vezes associada com o carbonato. Alguns cristais de hornblenda (< de 1%) com bordas fortemente corroídas e alteradas para clorita e plagioclásio estão também presentes no bolsão. A apatita está presente como cristais subidiomórficos associados à clorita.

A metavulcânica com hornblenda é maciça, tem granulação grossa e é inequigranular, com matriz granoblástica constituída por plagioclásio, quartzo, carbonato e clinozoisita e porfiroblastos de hornblenda. O plagioclásio ocorre como cristais grossos, com saussuritização fraca, geminação polissintética descontínua, contatos lobados, com domínios de subgrãos nas bordas. O quartzo constitui agregados de cristais com extinção ondulante e contatos lobados. Os porfiroclastos de hornblenda cristalizaram-se em duas gerações distintas, uma como porfiroclastos com pleocroísmo marrom e outra de porfiroblastos com pleocroísmo verde. A hornblenda marrom ocorre como cristais subidiomórficos com até 2,5 mm de comprimento, com bordas com clinozoisita e alteração parcial ou total para hornblenda verde (Fig. 7E). Alguns dos porfiroclastos apresentam alteração para clinozoisita e plagioclásio (Fig. 7F). A hornblenda verde forma porfiroblastos substituindo a hornblenda marrom e, geralmente, ocorre associada ao carbonato ou preenchendo fraturas e clivagens da hornblenda. A clinozoisita também é produto da alteração dos porfiroclastos e/ou cristais xenomórficos na matriz. Alguns cristais grossos de minerais opacos xenomórficos apresentam expressiva corona de leucoxênio quando associados à hornblenda marrom, os quais podem representar a ilmenita característica desse depósito. Como minerais acessórios ocorre allanita com halos pleocróicos na hornblenda verde, além de alguns poucos cristais de zircão. A clorita está presente em algumas porções, associada ao leucoxênio, produto da cloritização da biotita.

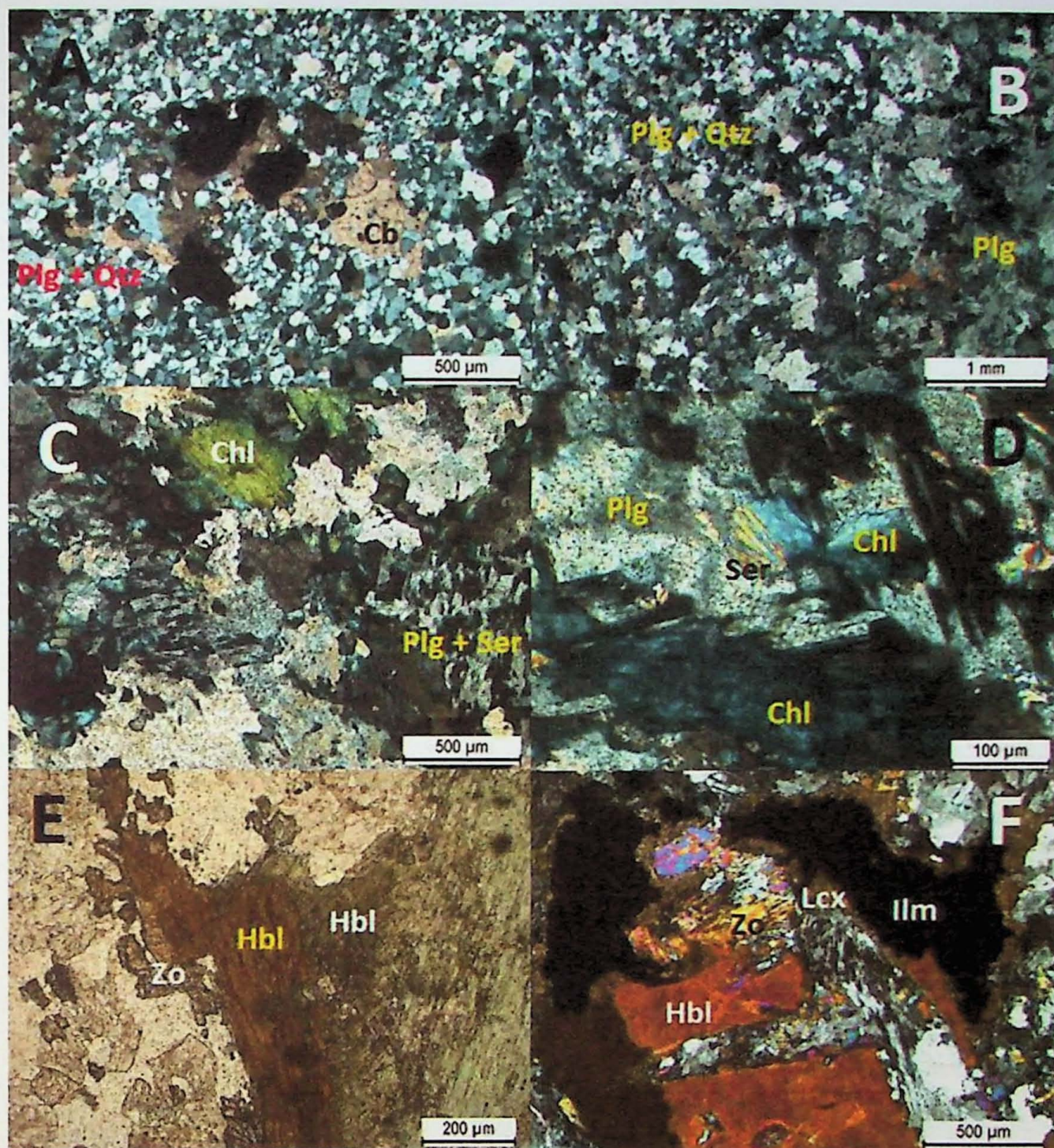


Figura 7: Fotomicrografias representativas do grupo das rochas metavulcânicas félsicas hidrotermalizadas, com as micrografias A e B da lâmina AAND-15B, C e D da AAND-15(A) e E e F da AAND-88 (35,80 m). A: Rocha granoblástica de composição quartzo-feldspática, com os minerais hidrotemais representados por minerais opacos e carbonato. B: Aspecto textural da porção mais grossa em contato com a parte mais fina da mesma rocha anterior. C: Aspecto dos minerais de alteração hidrotermal, com plagioclásio sericitizado, clorita e carbonato. D: Muscovita com hábito em leque em contato com clorita, produto da substituição do plagioclásio. E: Hornblenda marrom parcialmente substituída por hornblenda verde e clinozoisita. F: Alteração da hornblenda marrom para plagioclásio, quartzo e epidoto, com minerais opacos envolvidos por titanita.

4.1.3 Metagabro

O metagabro é inequigranular, com granulação fina a média, e com porções grossas correspondentes aos minerais formados pelas alterações hidrotemais. A cor varia de preto a cinza-esverdeado (Fig. 8D), com porções rosadas (Fig. 8C). O principal mineral constituinte é o anfibólio e o índice de cor ultrapassa 40% em algumas porções da rocha. A estrutura

predominante é maciça, porém há partes foliadas, com microdobras e um sistema de vênulas sobreposto, com coloração cinza-esverdeado (Fig. 8B).

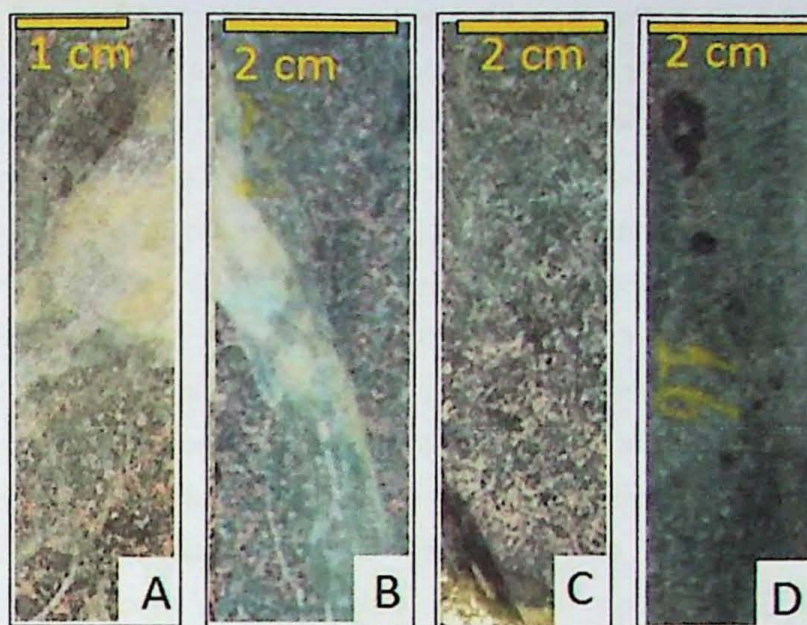


Figura 8: Fotografias de amostras dos testemunhos de sondagem da unidade do dique de metagabro, mostrando aspecto macroscópico da unidade. A, B e C representam as rochas hidrotermalizadas associadas à mineralização de Cu–Au. D: Aspecto geral do metagabro pouco alterado.

A alteração hidrotermal associa-se a um sistema de delgadas vênulas quartzo–feldspáticas cinza-claras a rosa-claras, que resultam na cristalização de anfibólio de granulação média a grossa nas rochas. Também ocorrem veios de sulfeto maciço, com cristais grossos de apatita e anfibólio com até 0,8 mm de comprimento, orientados perpendicularmente à borda das vênulas. Um veio de quartzo com calcopirita associada apresenta borda de alteração semelhante à observada no veio de sulfeto maciço.

O metagabro é constituído por dois conjuntos de rochas, os hornblenda-quartzo anfibolitos com bandamento discreto e escapolita-clorita-plagioclásio-quartzo-hornblenda anfibolito com epidoto, clinozoizita e allanita como minerais acessórios.

O hornblenda-quartzo anfibolito é inequigranular tem textura cataclástica recristalizada, com porfiroclastos de hornblenda de até 2 mm, granulação fina a média, e matriz granoblástica constituída por quartzo e hornblenda idiomórfica, localmente em arranjos nematoblásticos. O quartzo constitui agregados de cristais polygonizados com granulação de 0,05 mm a 0,01 mm. A hornblenda forma porfiroclastos com contatos lobados com o quartzo, extinção ondulante e, às vezes, agregados de cristais em arranjos radiados. Também apresenta subdomínios internos de cristais médios a finos em faixas ou nos contatos entre os cristais (Fig. 9A). Algumas ocorrências de minerais opacos intergranulares nos subdomínios de hornblenda são comuns.

O escapolita-clorita-plagioclásio-quartzo-hornblenda anfibolito apresenta textura cataclástica, com porfiroclastos de hornblenda marrom de até 1 cm de comprimento, com

laminação discreta, com leitos descontínuos granoblásticos ricos em quartzo, feldspatos e com arranjos de hornblenda com textura nematoblástica. Porfiroclastos de hornblenda marrom ocorrem em porções restritas da rocha, como grãos xenomórficos, podendo também ocorrer em agregados de cristais idiomórficos. Estão substituídos nas bordas e em fraturas por clinozoisita (Fig. 9C) e, de maneira mais pervasiva, foram substituídos parcialmente ou completamente por hornblenda verde. Apresentam inclusões arredondadas de quartzo e também de titanita subidiomórfica, apatita idiomórfica e clinozoisita com inclusões de minerais opacos. A hornblenda verde ocorre como cristais subidiomórficos a xenomórficos, frequentemente fraturados e dobrados, com extinção ondulante, com granulação entre 1 mm e 1,5 mm. Apresentam domínios internos de subgrãos com até 0,5 mm e, em alguns casos, substituindo por inteiro cristais mais grosso de hornblenda. Também podem apresentar inclusões de clorita com leucoxênio associados. O plagioclásio é representado por oligoclásio com forte saussuritização ou seritização, geminação polissintética irregular e com alguns cristais levemente dobrados. O quartzo compõe agregados granoblásticos com textura poligonizada, com cristais de até 0,4 mm. A clorita se associa à escapolita (Fig. 9E), formando agregados com cristais com granulação de até 0,5 mm, idiomórficos, com leucoxênio nas clivagens e nas bordas e, por vezes, ricos em inclusões de minerais opacos. A clinozoisita e o epidoto ocorrem principalmente como produto da saussuritização do plagioclásio e da alteração da hornblenda marrom, respectivamente. Como mineral acessório observam-se cristais zonados de allanita frequentemente substituídos ou envolvidos por epidoto/clinozoisita, ou como inclusões com halos pleocróicos fortes na hornblenda.

O metagabro apresenta pelo menos três fases de deformação, a primeira observada em dobras marcadas pelo anfibólio e lentes de quartzo (Fig. 9B), a segunda representada por um sistema de vênulas oblíquo ao bandamento discreto (Fig. 9D), com preenchimento por plagioclásio e quartzo em fraturas e uma terceira representada por veios de calcopirita perpendiculares ao sistema de vênulas (Fig. 9F). O plagioclásio das vênulas da segunda fase apresenta crescimento perpendicular à vênula, caracterizando um sistema de abertura e preenchimento. Essas vênulas apresentam geometria retilínea, com sinuosidades leves, e não ultrapassam 0,2 mm de espessura.

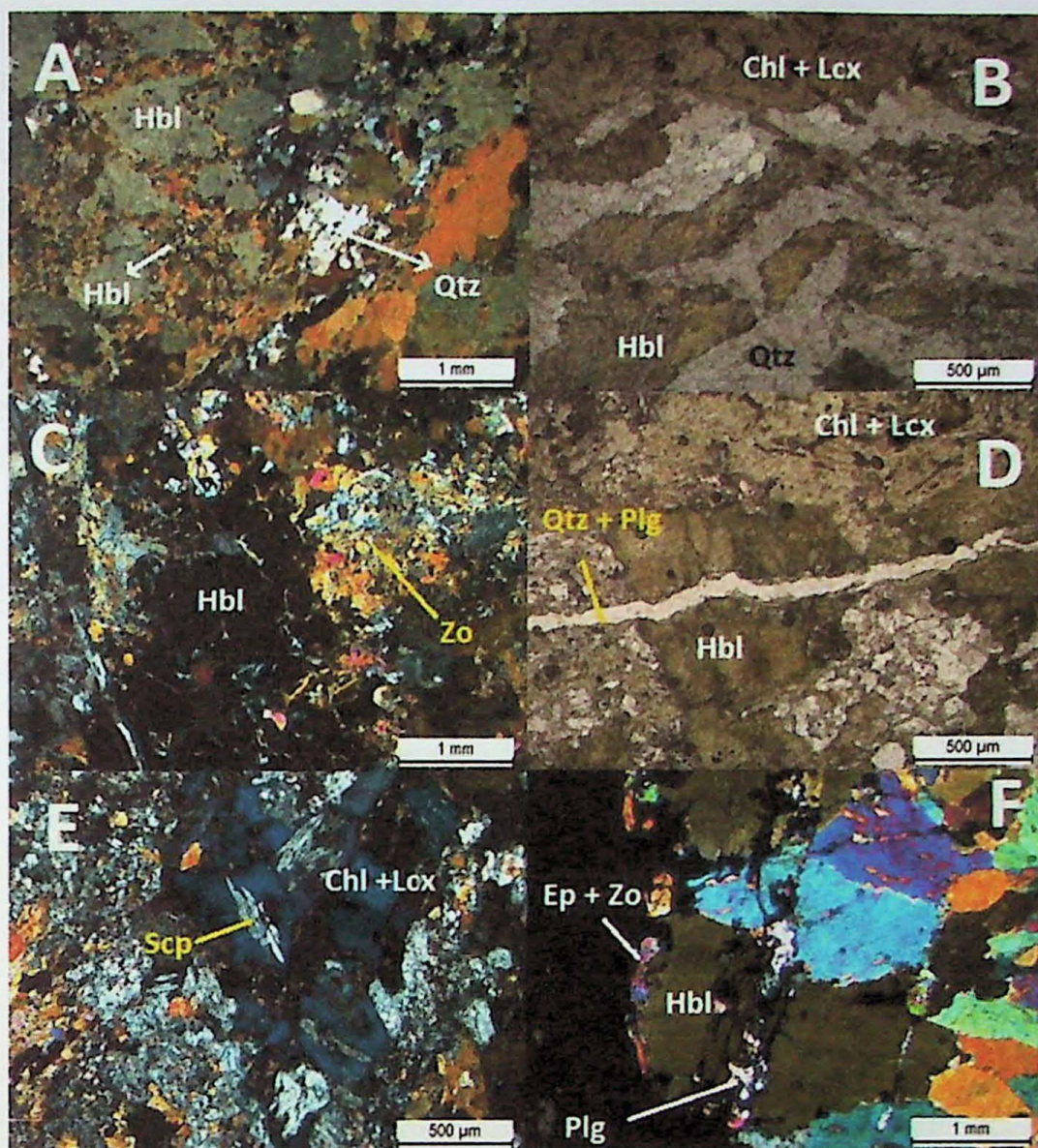


Figura 9: Fotomicrografias do dique de metagabro. A fotomicrografia A corresponde a lâmina AAND-29 (63,15 m), as B e C da lâmina ANDG-69 (16,00 m), e as D, E e F da lâmina ANDG-69 (31,00 m). A: Aspecto geral do anfibolito, com porfiroblastos de hornblenda apresentando domínios internos com agregados de granulação fina a média. B: Dobras marcadas pela deformação dos agregados poligonais de quartzo. C: porfiroclasto de hornblenda marrom parcialmente substituído por clinozoisita. D: Vênula quartzo-feldspática preenchendo estruturas de abertura e preenchimento. E: Agregados de clorita com leucocênio nos contatos e clivagens, com escapolita associada. F: Veio de minerais opacos e bordas de alteração com hornblenda hidrotermal. Os contatos entre os cristais de hornblenda e minerais opacos são marcados pela presença de plagioclásio, epidoto e clinozoisita. A borda de alteração hidrotermal apresenta fraturas subparalelas ao veio preenchidas por minerais opacos, epidoto e plagioclásio.

O veio de calcopirita é constituído por sulfeto maciço, com alguns poucos cristais de carbonato arredondados associados. Apresenta bordas de minerais hidrotermais com espessura de até 2,5 mm, compostas principalmente por hornblenda com orientação perpendicular ao veio e hábito radiado. O contato do veio com a borda de alteração de hornblenda é marcado pela presença de clinozoisita e plagioclásio com granulação entre 0,1 mm e 0,3 mm. A hornblenda apresenta granulação entre 0,5 mm e 2 mm, e pode estar intercrescida com cristais de até 1 mm de apatita. As bordas de alteração apresentam fraturamentos paralelos ao veio de sulfeto, com preenchido principalmente por minerais opacos, clinozoisita e plagioclásio.

4.1.4 Rochas Meta-intermediárias e Máficas Hidrotermalizadas

A rocha predominante é uma metavulcânica muito fina, de cor cinza-escuro, com estrutura maciça e porções milimétricas com formas arredondadas cinza-claras, que podem ser relíquias de megacristais recristalizados ou de amígdalas. Essa rocha é cortada por veios quartzo-feldspáticos brancos (Fig. 10B), com foliação bem marcada por filmes de minerais máficos. Estes veios apresentam calcopirita disseminada (Fig. 10A) e alguns cristais de molibdenita finos. Outra alteração hidrotermal é representada por um *stockwork* de vênulas quartzo-feldspáticas brancas (Fig. 10C).

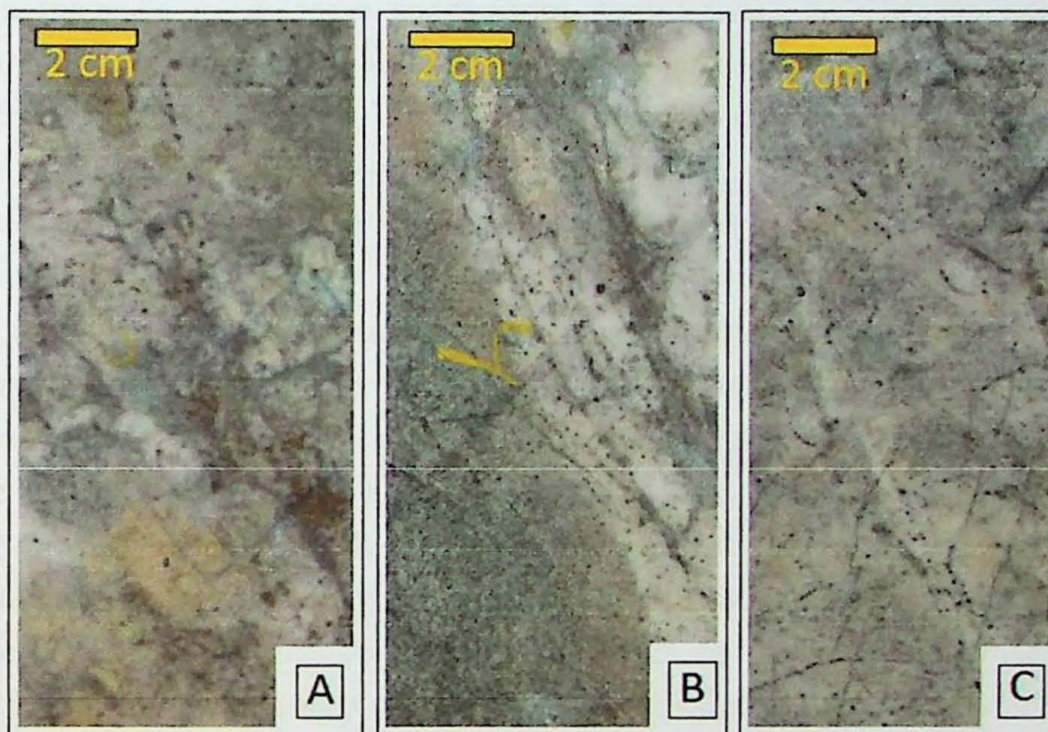


Figura 10: Fotografias mostrando aspecto macroscópico das rochas de amostras de testemunho de sondagem das rochas metavulcânicas intermediárias a máficas. A: Rocha fina, quartzo-feldspática com calcopirita disseminada. B: Rocha leucocrática muito fina com coloração cinzenta, cortada por veio feldspático com sulfetos. C: Estrutura em *stockwork* marcada por delgadas vênulas feldspáticas em rocha fina quartzo-feldspática.

Estas rochas são interpretadas como metavulcânicas formadas por hornblenda + oligoclásio + carbonato + clorita + clinozoizita + epidoto + quartzo, allanita e apatita como minerais acessórios. A metavulcânica é inequigranular tem granulação fina a média, composição quartzo-feldspática e texturas granoblásticas predominantes. O plagioclásio tem composição de oligoclásio, apresenta granulação média de 0,2 mm, está sempre sericitizado e com a geminação polissintética descontínua ou ausente em partes do cristal. A clorita ocorre como cristais xenomórficos com granulação até 1 mm, juntamente com leucoxênio em suas clivagens, e, geralmente, associados ao carbonato e ao plagioclásio límpido. Cristais finos de clorita idiomórfica em arranjos radiados também ocorrem, chegando até 0,5 mm de diâmetro. Carbonato xenomórfico com até 1 mm de comprimento ocorre geralmente associado à clorita, clinozoisita e plagioclásio límpido. A clinozoisita constitui cristais subidiomórficos, tem granulação até 1mm e está relacionada com a

alteração hidrotermal com carbonato, clorita e plagioclásio, onde ocorre em maior volume. Pode também constituir cristais xenomórficos finos disseminados pela rocha. A hornblenda compõe cristais subidiomórficos com granulação de 0,3 mm e texturas de dissolução, geralmente estando parcialmente substituídos por clorita ou carbonato (Fig. 11B). Como minerais acessórios ocorrem allanita como cristais finos associados à clorita e com borda de clinozoisita/epidoto, e apatita, que forma alguns poucos agregados de cristais subidiomórficos.

A principal variação composicional destas rochas se faz devido à presença ou ausência de hornblenda, sendo que a porcentagem de hornblenda pode variar de 5% até 50%. A hornblenda ocorre como porfiroclastos com texturas de corrosão nas bordas, parcialmente ou completamente substituído por clorita, principalmente nas clivagens e bordas, com granulação entre 1 mm e 1,2 mm. Também podem conter inclusões de carbonato e plagioclásio. A hornblenda pode apresentar núcleos de hornblenda marrom, representando cristais provavelmente ígneos substituídos pela hornblenda verde, típica das alterações hidrotermais.

A rocha apresenta alterações hidrotermais associadas a vênulas retilíneas com espessuras de até 0,2 mm compostas por plagioclásio e titanita, com minerais opacos e clorita e/ou vênulas de plagioclásio (Fig. 11C) e bolsões zonados (Fig. 11A) com bordas de carbonato + plagioclásio + apatita + clorita e núcleos de clinozoisita e epidoto subidiomórfico com até 1 mm, clorita e plagioclásio e, eventualmente, allanita.

Vênulas de granulometria grossa, com minerais opacos com carbonato (Fig. 11F), epidoto, clinozoisita e plagioclásio ocorrem em rochas de composições semelhantes às descritas acima. Nestas vênulas o oligoclásio tende a ter hábito idiomórfico, tem geminação polissintética descontínua, inclusões de carbonato, clinozoisita e de minerais opacos. Os contatos são preferencialmente retos, mas podem apresentar agregados de subgrãos com contatos lobados. A granulação no veio chega a 2 mm. O epidoto e a clinozoisita ocorrem principalmente associados aos minerais opacos ou ao carbonato e formam cristais subidiomórficos de até 1,2 mm, com alguns apresentando allanita associada. Os minerais opacos compõem agregados subidiomórficos a xenomórficos dispersos em veios e vênulas e apresentam granulação de até 1,5 mm. Nessa mesma lâmina ocorrem um veio descontínuo de carbonato de granulação grossa, com cristais de até 2 mm, com as bordas do veio marcadas pela presença de clorita (Fig. 11E) e uma zona de alteração hidrotermal, composta basicamente por cristais idiomórficos a subidiomórficos de clinozoisita com granulação até 1,5 mm de comprimento (Fig. 11D).

Vênulas retilíneas e falhadas estão presentes em porções com forte cloritização, são preenchidas por clorita + quartzo com epidoto e clinozoisita associados, e plagioclásio + allanita + minerais opacos subordinados. A alteração ocorreu em estilo fissural gradando a pervasivo, com um aumento significativo da porcentagem de clorita na encaixante nas

proximidades das vênulas, produto principalmente da substituição da hornblenda. A clorita ocorre associada ao leucoxênio e à escapolita. O quartzo apresenta extinção ondulante, predomínio de contatos poligonais, com contatos lobados sobrepostos, com subgrãos com contatos lobados, granulometria variando entre muito fino até 0,4 mm. Nos planos das microfalhas que afetam as vênulas houve preenchimento por clorita.

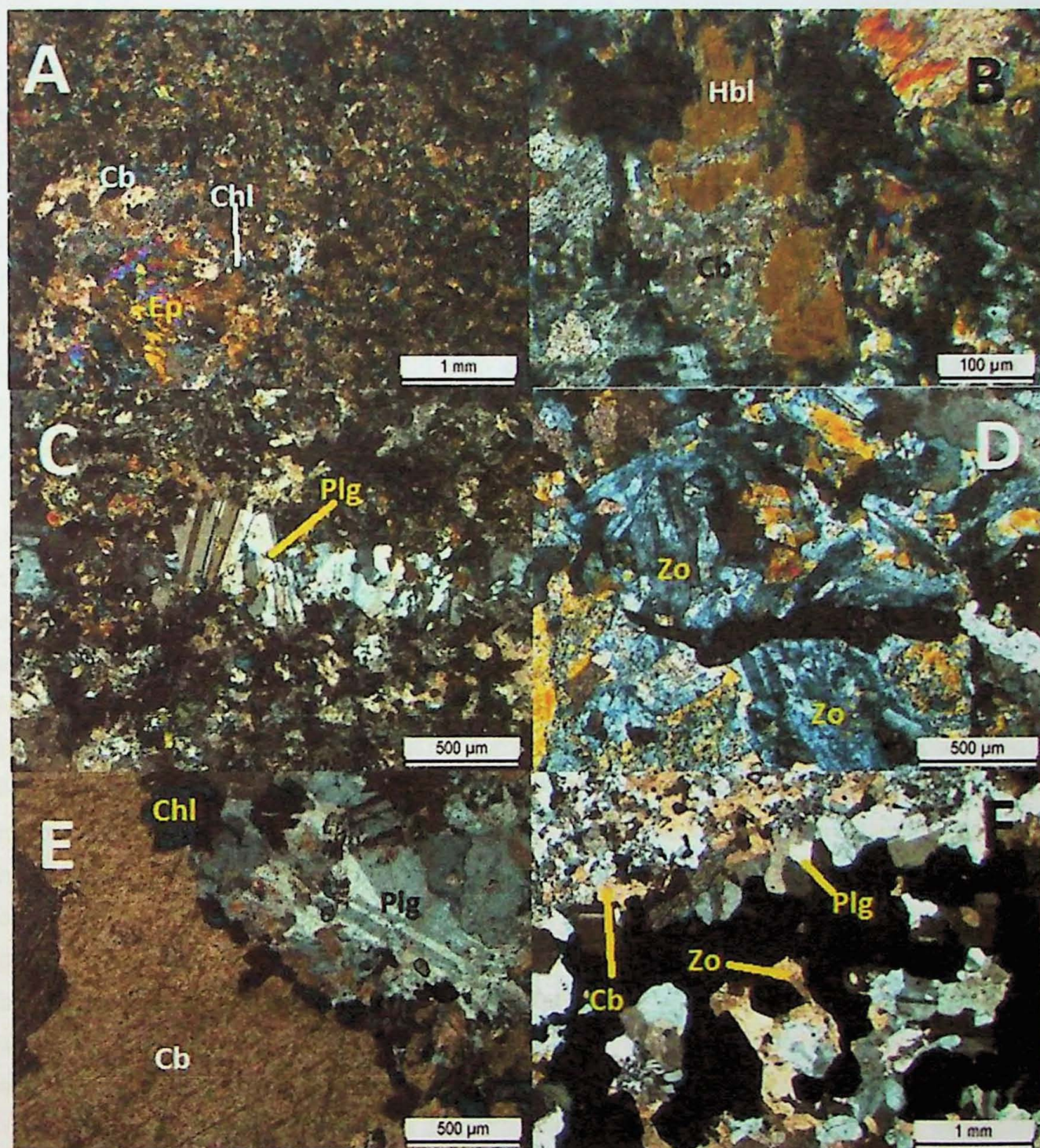


Figura 11: Fotomicrografias do grupo das rochas meta-intermediárias e máficas hidrotermalizadas. As fotomicrografias A e B correspondem à lâmina ANDG-03 (2A), a C à lâmina ANDG-03 (2B), e as D, E e F à lâmina ANDG-03 (10,00 m). A: Bolsão com minerais de alteração hidrotermal na porção esquerda inferior, zonado com núcleo de epidoto, clinozoisita, clorita e plagioclásio e bordas de clorita, plagioclásio e calcita. B: Hornblenda parcialmente substituída por carbonato. C: Vênula de plagioclásio com geminação polissintética, com eixo maior perpendicular às paredes da vênula. D: Cristais subeuédricos de clinozoisita hidrotermais, com algum plagioclásio e carbonato associados. E: Vênula de carbonato com bordas de clorita. F: Veio de opaco com

plagioclásio, carbonato, clinozoisita, epídoto e clorita, com bordas marcadas por cristais de plagioclásio com textura comb.

4.1.5 *Minérios e Brechas Associadas*

Neste item são descritas as gangas relacionadas à mineralização de cobre e ouro, feitas no estudo das seções delgadas com lamínulas.

As mineralizações no depósito Antas Norte são compostas predominantemente por brechas hidrotermais com anfibólio e quartzo hidrotermal, sendo o mineral de minério essencialmente calcopirita, com pirrotita subordinada, rara pirita e, por vezes, esfalerita, além de quantidades variadas de apatita e ilmenita.

Foram descritas quatro seções delgadas com lamínula representativas do minério e das alterações hidrotermais associadas. As seções delgadas são de uma brecha de sulfeto maciço (AAND-31 – 101,05 m), de veio de sulfetos associados à alteração hidrotermal com silicificação (AAND-14 – 73,15 m), da borda da alteração hidrotermal próxima à brecha de sulfeto (AAND-76 – 43,70) e de um veio de sulfeto maciço com borda com alteração hidrotermal (AAND-76 – 43,70).

A brecha de sulfeto maciço é composta por sulfetos e agregados de cristais, por vezes brechados e fraturados, principalmente de hornblenda, apatita e quartzo. Ocorrem dois tipos de hornblenda, uma com pleocroísmo marrom e outra com pleocroísmo verde, com clinozoisita associada, esta produto de substituição da anterior (Fig. 12C). Os cristais de hornblenda são subidiomórficos, com poucos cristais idiomórficos, têm granulação variando de 0,3 mm a 2,2 mm e os contatos são marcados pela presença de quartzo com formas arredondadas. O quartzo está presente de modo subordinado, formando agregados com grãos poligonais entre os cristais de hornblenda e não apresentam extinção ondulante. A apatita tem hábito semelhante ao do quartzo, com granulação que alcança até 1,2 mm, ocorrendo disseminada na rocha ou compondo agregados de cristais subidiomórficos. A hornblenda pode estar parcialmente substituída por clinozoisita com inclusões de minerais opacos e, menos frequentemente, por biotita. A biotita está também presente como pseudomorfos de clorita e leucoxênio com granulação 0,05 mm. Rutilo pode ocorrer nas bordas de cristais de hornblenda em contato com os minerais opacos e é associados a anfibólio com pleocroísmo para tons azulados (Fig. 12D), indicando composições mais sódicas típicas das alterações hidrotermais dos IOCGs na Província Mineral de Carajás.

Os minerais frequentemente têm fraturas e clivagens preenchidas por minerais opacos e as bordas dos agregados apresentam-se brechadas, indicando que os sulfetos foram introduzidos na rocha em fase relativamente tardia às demais alterações hidrotermais.

Os sulfetos associados à alteração com silicificação apresentam minerais de alteração hidrotermal constituídos principalmente por hornblenda com inclusões arredondadas de quartzo, com granulação de 2 mm a 3 mm, extinção ondulante e presença

de domínios de subgrãos com granulação entre 0,2 mm e 0,5 mm. A hornblenda está comumente substituída por anfibólio azulado, resultando em cristais com aspecto manchado, marcados pela diferença no pleocroísmo de verde-claro para verde-musgo, em contraste com pleocroísmo verde-claro a verde-azulado. Ambos anfibólios podem apresentar núcleos e relíquias de pargasita inclusas (Fig. 12B), assim como inclusões xenomórficas de carbonato, que também se associa às fraturas e clivagens, e de minerais opacos, por vezes com rutilo no contato com os grãos de anfibólio.

Na porção da lâmina cortada por vênulas de minerais opacos e ou brechadas, observa-se a presença de cristais de apatita de até 8 mm de comprimento. A apatita ocorre tanto como borda das vênulas como internamente, e pode apresentar uma fina borda de epídoto no contato com os minerais opacos.

Silicificação, representada por agregados monominerálicos de quartzo com textura granoblástica e granulação variando entre 1,2 mm e 3,5 mm, ocorrem localizadamente nas amostras. O quartzo apresenta extinção ondulante setorizada, contatos predominantemente lobados e com subgrãos e/ou agregados de subgrãos com contatos lobados (Fig. 12A).

A borda de alteração relacionada à brecha de calcopirita é composta basicamente por hornblenda com pleocroísmo verde, apatita e ilmenita. A hornblenda tem hábito plumoso (Fig. 12E), típico de cristalização a partir de fluidos hidrotermais, extinção ondulante, granulação de 3 mm a 7,5 mm, com inclusões de quartzo com formas arredondadas preferencialmente acompanhando os planos de clivagem e de geminação. A apatita constitui cristais muito grossos, chegando a 2 cm, ou forma agregados de cristais subidiomórficos. Apresenta extinção concêntrica das bordas para os núcleos e fraturas preenchidas ora por carbonato, ora por minerais opacos. Cristais subidiomórficos de minerais opacos com borda de titanita, com granulação variando de 1 mm a 2,2 mm ocorrem associados à apatita (Fig. 12F). A hornblenda verde exibe algumas porções com pleocroísmo castanho-claro a marrom, indicando ser produto da substituição da hornblenda marrom.

O minério, presente em todos os testemunhos descritos, constitui veios, vênulas, brechas (Fig. 12D) e disseminações e apresenta como mineral de minério principal a calcopirita.. A mineralização apresenta nas bordas dos veios minerais hidrotermais com cristais grossos de anfibólio e apatita. As brechas podem estar associadas a porções silicificadas (Fig. 12C) ou com veios de quartzo.

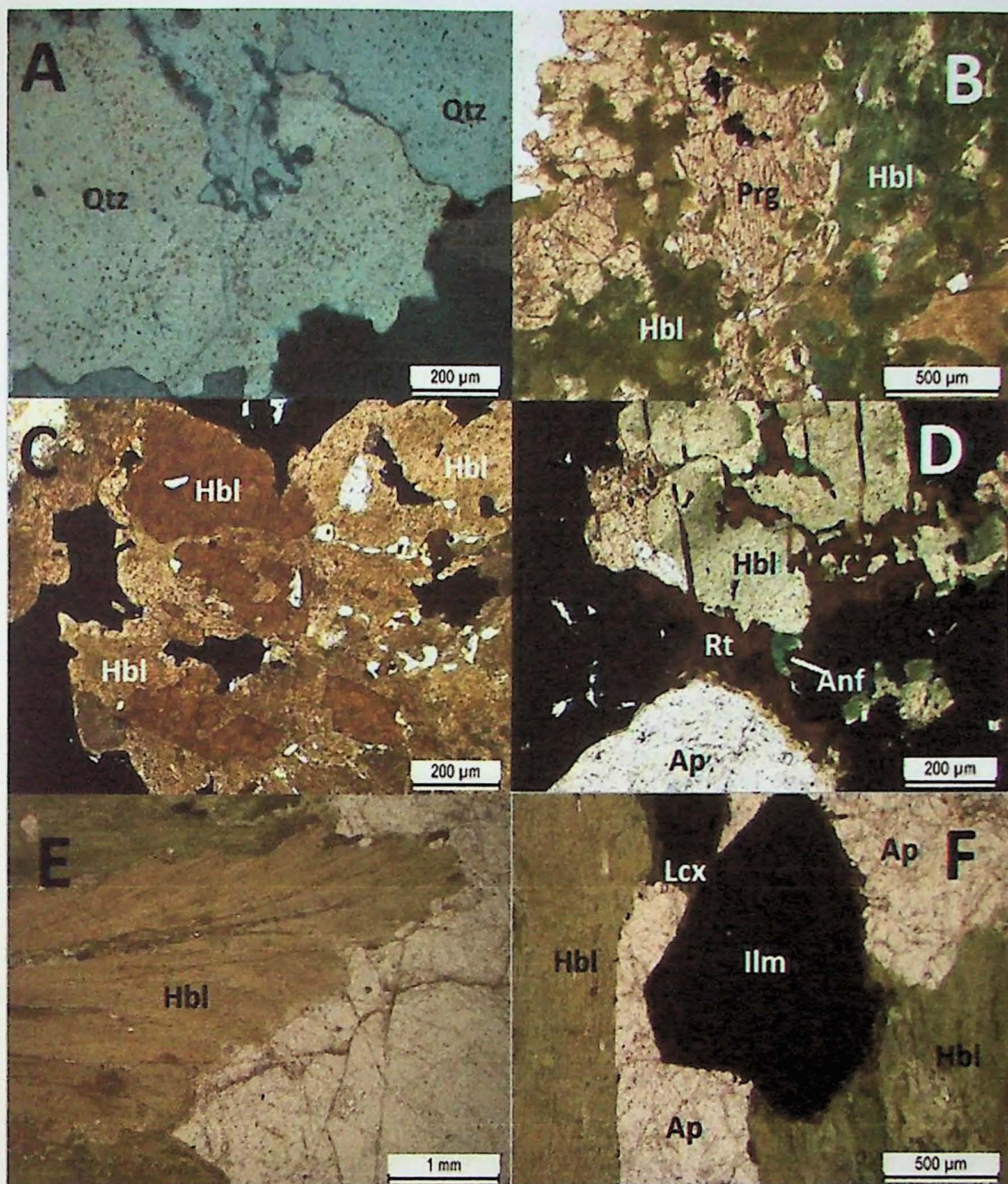


Figura 12: Fotomicrografias dos minérios e das rochas hidrotermalizadas associadas. As fotomicrografias A e B correspondem à lâmina AAND-14 (53,15 m), as C e D à lâmina AAND-31 (101,05 m), e as E e F a lâmina AAND-76 (43,70 m). A: Aspecto geral do veio granoblástico de quartzo. Os contatos são predominantemente lobados com domínios de subgrãos muito finos. B: Clinopiroxênio de cor bege, xenomórfico, substituído parcialmente por hornblenda. C: Agregados de cristais de hornblenda com pleocroísmo marrom na brecha de sulfeto, com substituição parcial por hornblenda verde. D: Contato entre hornblenda e minerais opacos marcado pela presença de rutilo e substituição da hornblenda por anfíbólio verde-azulado. E: Hábito plumoso dos cristais de hornblenda hidrotermal. F: Cristais subeuédricos de mineral opaco com borda de titanita, em contato com cristais de hornblenda e apatita.

4.2 Caracterização Petrográfica das Mineralizações

As mineralizações cupro-auríferas do depósito Antas Norte ocorrem na forma de veios, vênulas (Fig. 13d) e brechas de sulfeto maciço (Fig. 13a), que cortam as unidades e alterações hidrotermais reconhecidas.

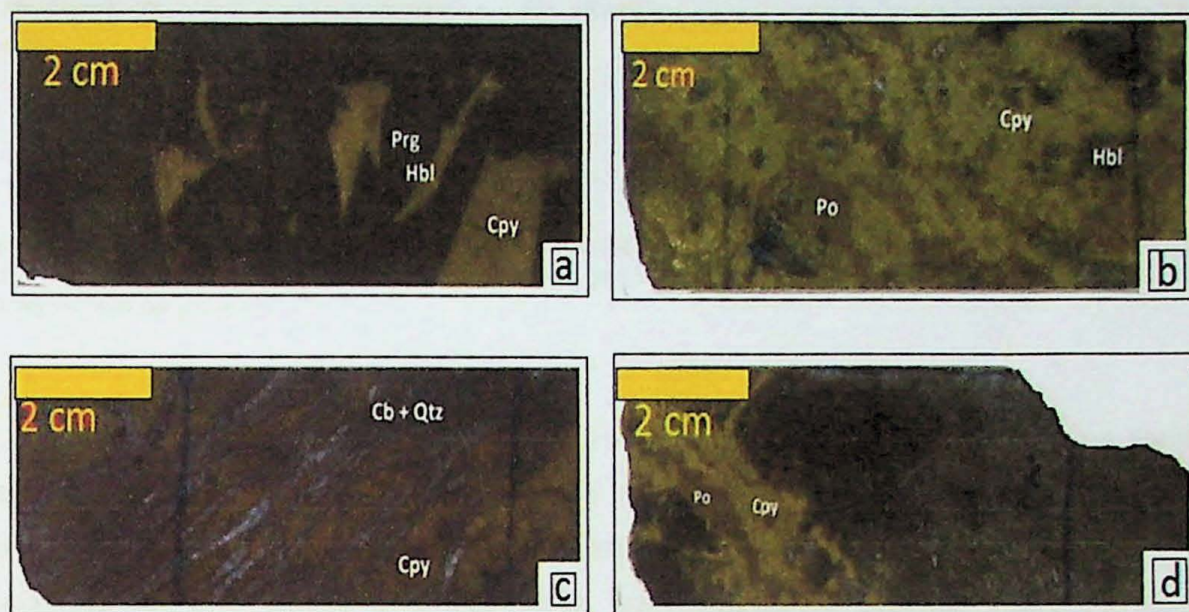


Figura 13: Fotografias de amostras de testemunhos de sondagem representativas das mineralizações encontradas no depósito de Cu-Au Antas Norte. A: Brecha de calcopirita com fragmentos de cristais muito grossos de pargasita com borda de alteração para hornblenda. B: Brecha de calcopirita com pirrotita associada e fragmentos de alteração hidrotermal com assembleia mineral com ilmenita, apatita e hornblenda. C: Veio de calcopirita maciça cortada por sistema de vênulas de quartzo com carbonato. D: Veio de calcopirita com estrutura brechóide nas bordas, cortado por vênula de pirrotita.

As mineralizações são compostas principalmente por calcopirita, podendo ocorrer pirrotita associada e pirita subordinada. A calcopirita ocorre como fase inicial da mineralização, associada à pirita idiomórfica, podendo ser brechada ou cortada por vênulas de pirrotita (Fig. 13b), e a pirita ocorre geralmente como produto da interação entre a calcopirita e/ou a pirrotita com a ganga e/ou como vênulas tardias que cortam a mineralização.

A calcopirita na forma de agregados de cristais idiomórficos intercrescidos, inequigranulares com granulometria variando de fino a grosso, ocorre geralmente associada à pirita idiomórfica a subidiomórfica (Fig. 14A). Ocorre como principal mineral da matriz das brechas e veios (Fig. 14B) podendo ocorrer infiltrada em fraturas e clivagens dos minerais de ganga, tanto nas alterações associadas como nos fragmentos das brechas.

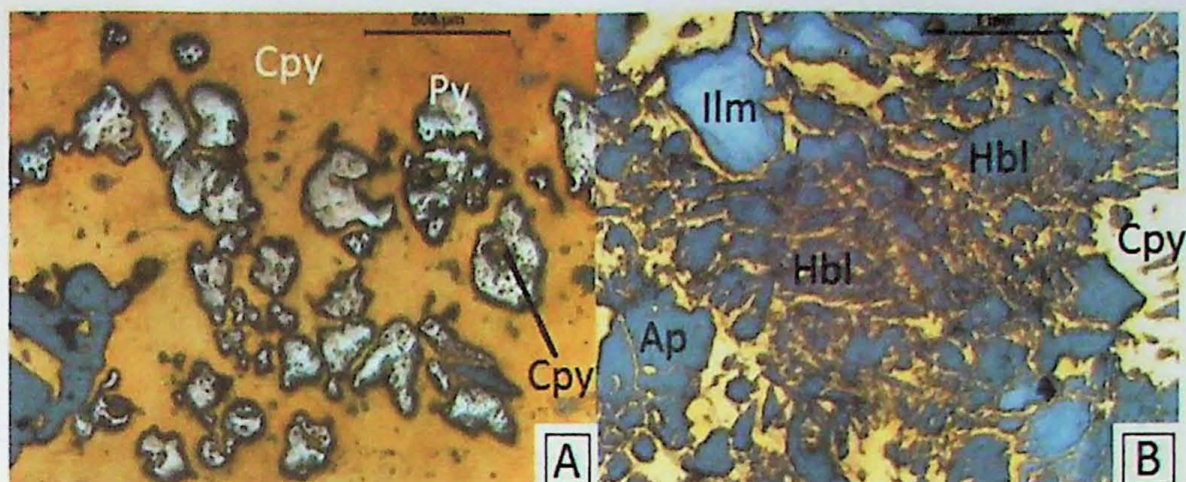


Figura 14: Fotomicrografias representativas do minério de Cu-Au do depósito Antas Norte. A: pirita idiomórfica a subidiomórfica na calcopirita com inclusões na forma de blebs de calcopirita. B: brecha com calcopirita infiltrada nos fragmentos de ganga.

A pirrotita ocorre como vênulas e brechas na calcopirita (Fig. 15B), na forma de agregados de cristais com contatos retos e lobados, inequigranulares com granulometria variando de 0,1mm a 0,6mm, apresenta inclusões de calcopirita. A pirrotita ocorre também no contato entre a ganga e a calcopirita, com intercrescimento de ripas de anfibólio, podendo conter inclusões de magnetita idiomórficas a subidiomórficas (Fig. 15A). Nos pseudomorfos de biotita cloritizados, a pirrotita pode ocorrer como inclusões subeuédricas a anédricas com granulometria entre 0,1mm e 0,2mm.

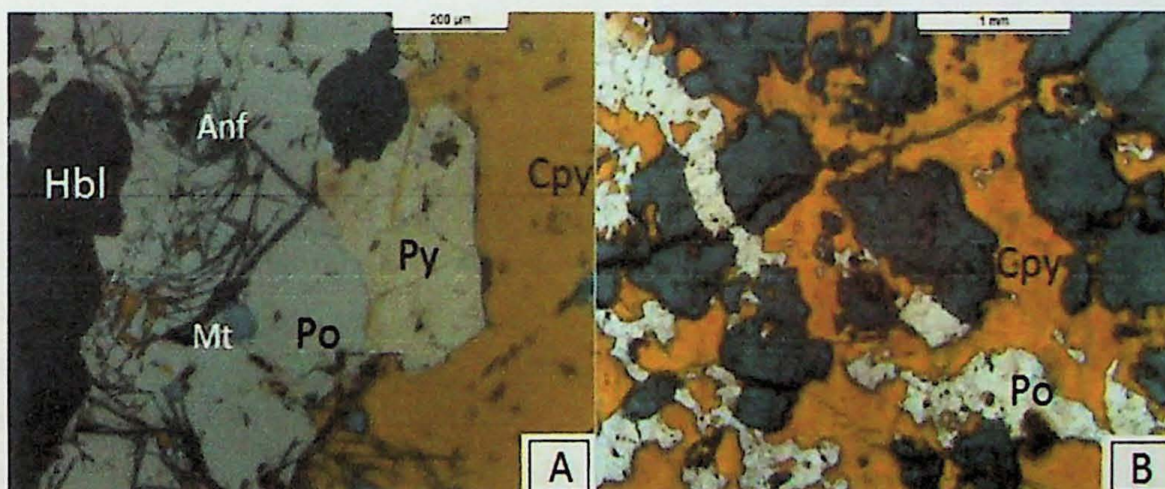


Figura 15: Fotomicrografias representativas do minério de Cu-Au do depósito Antas Norte. A: Veio de calcopirita com pirrotita e pirita associada à ganga, com intercrescimento de anfibólio na pirrotita próxima a ganga. Pirrotita com inclusões idiomórficas de magnetita e inclusões xenomórficas de calcopirita. B: Brecha de calcopirita e ganga associada cortadas por vênula descontínua de pirrotita.

A pirita com cristais idiomórficos a subidiomórficos pode conter inclusões arredondadas de calcopirita (Fig. 16A), com granulometria de 0,2mm, ocorre associada à calcopirita. Uma segunda geração de pirita ocorre no contato entre a calcopirita e a ganga (Fig. 16B) e/ou entre a pirita idiomórfica e a calcopirita, com hábito dendrítico envolvendo a ganga ou na borda dos cristais de pirita. A pirita ocorre também preenchendo fraturas tardias em relação à mineralização (Fig. 16C) (Fig. 16D).

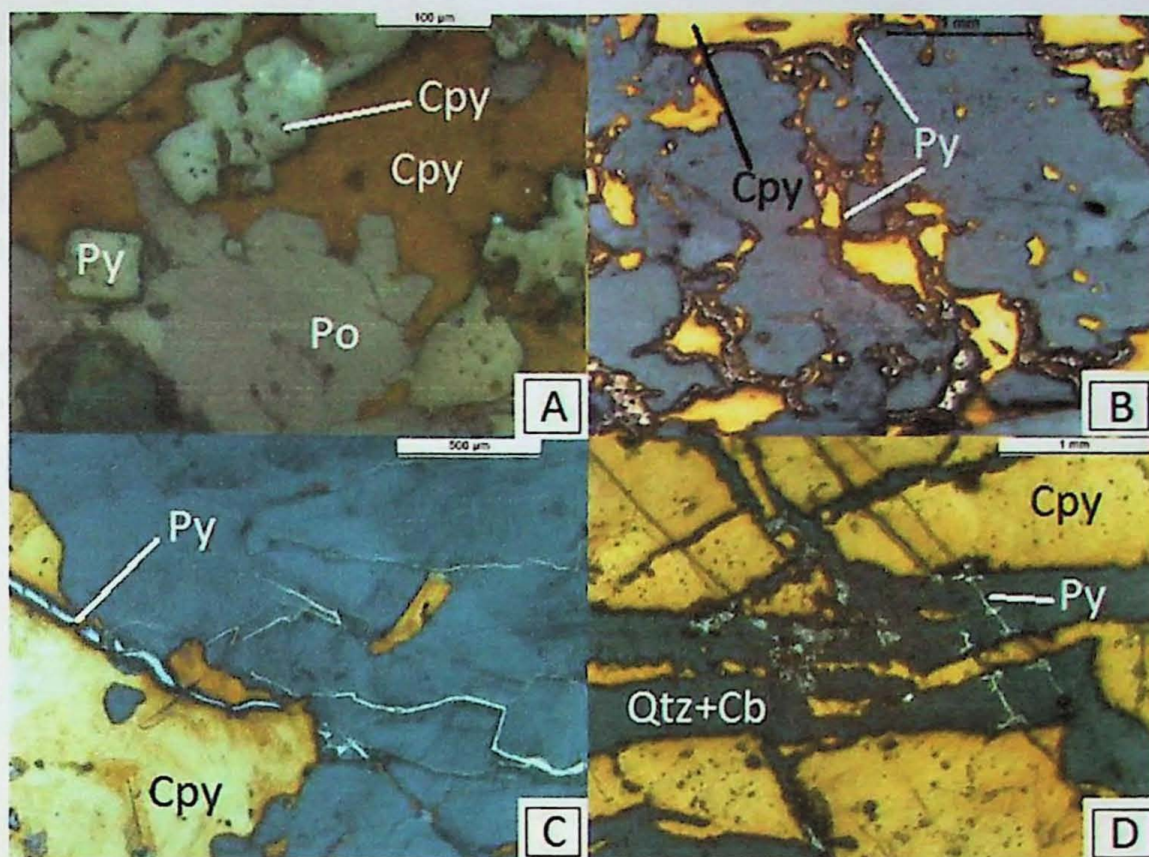


Figura 16: Fotomicrografias representativas do minério de Cu-Au do depósito Antas Norte. A: Pirita idiomórfica com inclusões na forma de blebs de calcopirita. Pirrotita associada à ganga. B: Pirita marcando o contato entre a ganga e a calcopirita. C: Pirita preenchendo fraturas na calcopirita e na ganga. D: Veio de calcopirita maciça cortado por vênulas de quartzo e carbonato. Pirita preenchendo fraturas oblíquas às vênulas de quartzo.

Os fragmentos das brechas são compostos por fragmentos de anfibolito pargasítico ou por cristais de hornblenda e apatita com ilmenita associada, podendo conter também cristais de allanita e epidoto.

A hornblenda compõe agregados granoblásticos nos fragmentos, ou como cristais individualizados, apresenta zonamento, com núcleo de hornblenda marrom envolto por hornblenda verde, podendo também ocorrer grunerita no contato entre a hornblenda verde e a calcopirita (Fig. 17B). Alguns fragmentos de anfibolitos apresentam pargasita como agregados granoblásticos monominerálicos, e quando em contato com a calcopirita, apresentam borda de alteração para hornblenda verde (Fig. 17A).

A apatita ocorre como cristais idiomórficos a subidiomórficos arredondados, com fraturas preenchidas por calcopirita. Ocorre em fragmentos de ilmenita + apatita + hornblenda, ou como cristais individualizados, com granulação entre 0,3 mm até 2,5 mm (Fig. 17C).

A ilmenita ocorre como inclusões na apatita e na hornblenda, subidiomórfica com borda de leucoxênio, granulação entre 0,1 mm e 0,6 mm, ou como cristais subidiomórficos nos agregados de ilmenita + apatita + hornblenda ou como fragmento de brechas (Fig. 17E), podendo ocorrer na forma de bastonetes (Fig. 17D). A ilmenita ocorre principalmente

associada à ganga e pode apresentar inclusões idiomórficas de magnetita e/ou como associação na borda dos cristais de magnetita.

A magnetita ocorre associada principalmente a calcopirita, na forma de cristais idiomórficos, com granulometria média de 0,1 mm, pode ser substituída parcialmente pela ilmenita.

Allanita inclusa na hornblenda, ou como cristais grossos, zonados e com sobrecrecimento nas bordas por epidoto e/ou zoizita. O epidoto pode ocorrer também substituindo cristais de hornblenda nas bordas e ou em fraturas preenchidas por calcopirita.

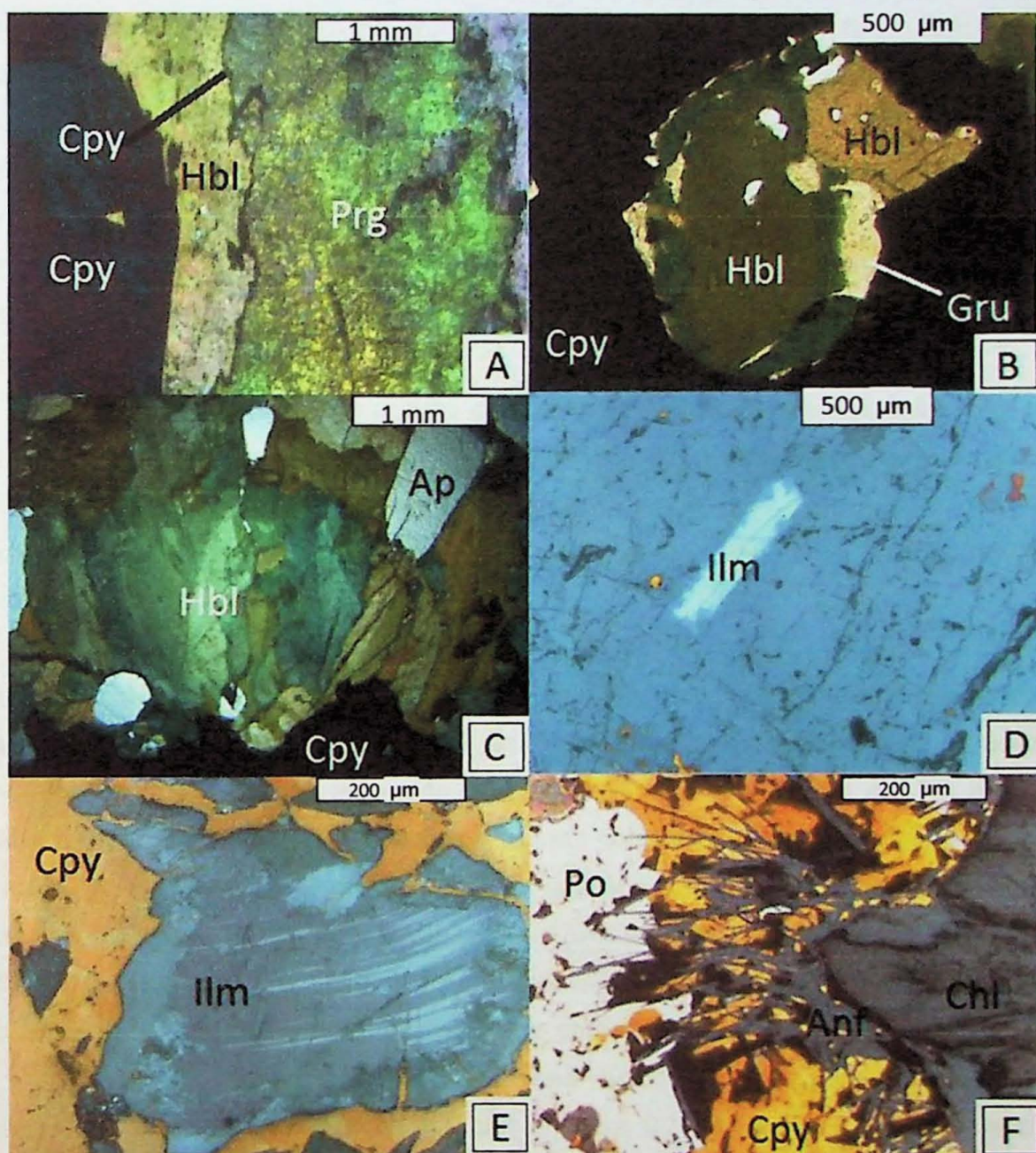


Figura 17: A: Porfiroblasto de pargasita com borda alterada para hornblenda no contato com a calcopirita. B: Cristal zonado de anfíbólio, com núcleo de hornblenda e bordas de grunerita. C: Detalhe da alteração (Fe)-Cálcica associada à mineralização, cristais plumosos de hornblenda intercrescidos com apatita. D: Ilmenita inclusa em hornblenda. E: Ilmenita com lamelas como fragmento de brecha de calcopirita. F: Borda de alteração do veio de calcopirita com clorita com textura radiada e intercrescimento de anfíbólio na calcopirita e na pirrotita associada.

Os fragmentos das brechas são equivalentes às zonas de alteração (Fe)-cálcica, caracterizados por bordas de alteração com poucos milímetros de espessura, podendo chegar até alguns centímetros, compostas por ilmenita + apatita + hornblenda $\pm$ allanita $\pm$ epidoto $\pm$ plagioclásio $\pm$ quartzo $\pm$ carbonato.

Algumas vênulas de calcopirita com pirrotita apresentam borda de alteração associada com titanita + epidoto + plagioclásio + quartzo + clorita + carbonato, com predomínio de clorita e quartzo. A clorita pode ocorrer em arranjos radiados ou em leque a partir das paredes das vênulas (Fig. 17F), com leucoxênio associado. O quartzo apresenta contatos interlobados sobrepostos por domínios de subgrãos muito finos com contatos lobados. O plagioclásio tem composição de oligoclásio, com aspecto límpido em relação ao da rocha hospedeira e ocorre associado ao epidoto marcando o contato entre a borda de alteração e a vênula de sulfeto. Apesar da alteração associada às vênulas de sulfeto não serem iguais com as descritas anteriormente (ilmenita + apatita + hornblenda), os fragmentos de ganga nas vênulas apresenta essencialmente agregados de ilmenita + plagioclásio + apatita + hornblenda, reforçando a associação da alteração (Fe)-cálcica com a mineralização.

Vênulas de quartzo e carbonato com epidoto cortam a mineralização (Fig. 13c), podendo conter pirita associada às bordas das vênulas e, localmente, arsenopirita. As vênulas podem ocorrer como estruturas retilíneas, falhadas, com espessura inferior a 8,0 mm, ou como sistema de vênulas com padrão anastomosado (Fig. 18C), espessura variada entre 0,5 mm até 5 mm.

Nas vênulas, o quartzo apresenta granulação entre 0,2 mm e 0,5 mm, com zonamento textural da borda para o núcleo (Fig. 18D), com textura *comb* (Fig. 18B) nas bordas, passando para faixas de subgrãos com contatos lobados e granulação inferior a 0,1 mm, e domínio central com agregado granoblástico com granulação de 0,2 mm, com contatos poligonizados e por vezes sobrepostos por contatos lobados. Os cristais de quartzo são muito ricos em inclusões fluidas, sólidas, gasosas e mistas, e apresentam linhas de crescimento paralelas a borda das vênulas (Fig. 18A). A ocorrência de quartzo com extinção ondulante e inclusões de epidoto com granulação entre 0,1 mm e 0,3 mm, está espacialmente associados a maior ocorrência de carbonato nas vênulas.

O carbonato ocorre principalmente nas bordas das vênulas, possui formas idiomórficas a subidiomórficas, com granulação entre 0,3 mm e 1,2 mm, associados ao epidoto e a porções onde o quartzo apresenta extinção ondulante com mais frequência.

A pirita ocorre nas bordas das vênulas e preenchendo fraturas, principalmente no contato entre as vênulas e a calcopirita.

Os contatos dos carbonatos podem apresentar uma fina capa de hematita, associada localmente a pirita, preenchendo também fraturas e clivagens dos minerais.

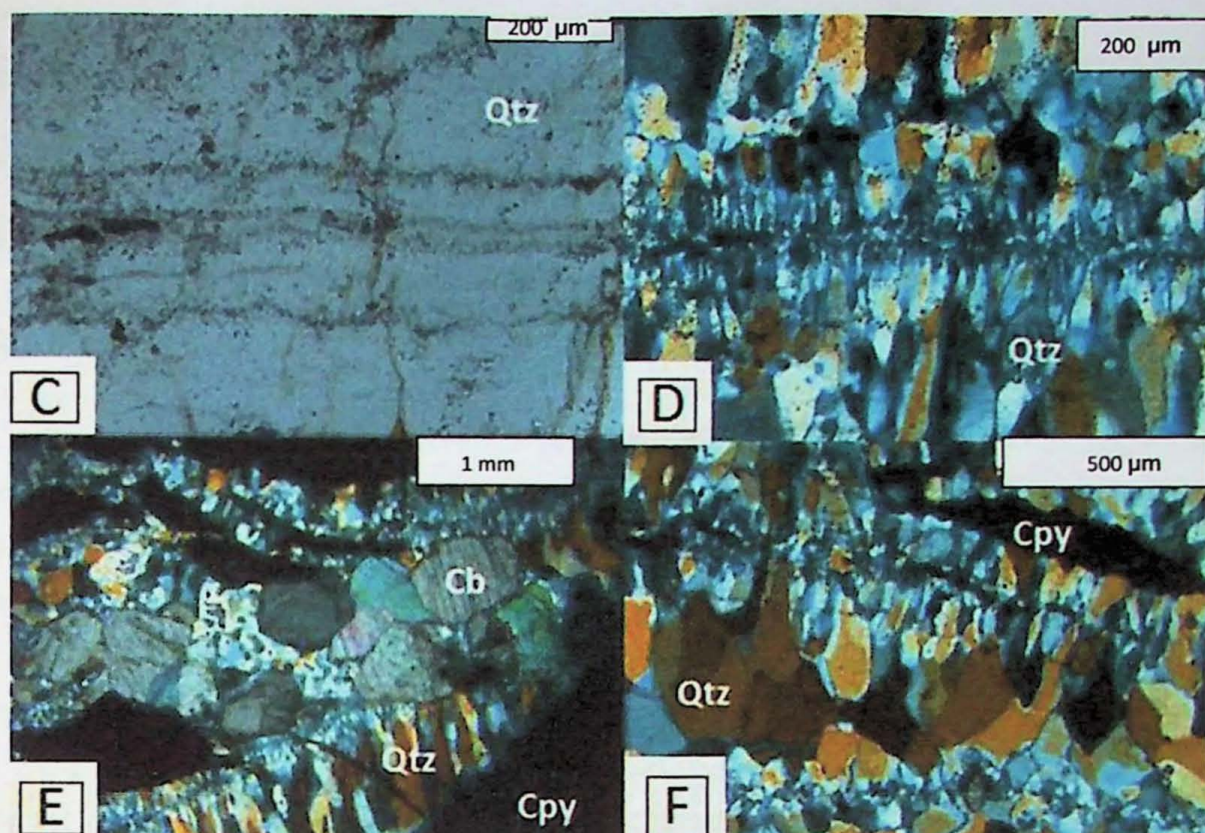


Figura 18: Fotomicrografias das vênulas de quartzo e carbonato na calcopirita. A: Detalhe das linhas de crescimento na vênula marcada por diversas inclusões fluidas, sólidas e gasosas. B: Detalhe da textura *comb* do quartzo e para domínio interno com subgrãos com contatos lobados. C: Aspecto geral das vênulas com carbonato grosso e quartzo *comb*. D: Zonamento textural com quartzo *comb* nas bordas, subgrãos com contatos lobados mais no núcleo e núcleo granoblástico com cristais polygonizados.

4.3 LITOQUÍMICA

Foram selecionadas nove amostras das quatro unidades descritas, utilizando como critério de seleção porções das rochas inalteradas ou pouco alteradas hidrotermalmente. Os resultados das análises estão no Anexo 1 e a relação entre as amostras utilizadas e as unidades correspondentes é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela com relação entre as amostras e as unidades correspondentes, e breve descrição macroscópica das amostras.

AMOSTRA	UNIDADE	DESCRIÇÃO
ANDG-03-I	MVI	Metavulcânica cinza-escura muito fina e com estrutura maciça.
ANDG-03-II	MVI	Metavulcânica cinza-escura muito fina com estrutura maciça.
ANDG-03-III	MVI	Metavulcânica cinza muito fina, cortada por sistema de vênulas brancas feldspáticas.
AAND-15-V	MVF	Metavulcânica Félsica cinza-clara fina com estrutura maciça.
AAND-15-VI	MVF	Metavulcânica Félsica rosada, fina com estrutura maciça, alterada hidrotermalmente.
AAND-57-VII	MVM	Anfibolito fino, de cor preta, estrutura maciça e granulação fina.
AAND-57-VIII	MVM	Anfibolito médio, de cor verde-clara, estrutura maciça, granulação média, alterada

		hidrotermalmente.
AAND-69-IX	MG	Metagabro de cor preta, estrutura maciça e granulação média.
AAND-69-X	MG	Metagabro maciço médio, das proximidades a mineralização de sulfetos.
AAND-57-IV	CB	Rocha carbonática grossa, de cor branca, com estrutura maciça e com calcopirita associada.

MVI = metavulcânicas Intermediárias; MVF = metavulcânicas félsicas; MVM = metavulcânicas máficas; MG = metagabro; Cb = Carbonatito.

As análises geoquímicas foram utilizadas para classificação das rochas segundo os diagramas propostos por De La Roche *et al.* (1980), sendo um deles para as rochas vulcânicas (Fig. 19A) e um para as rochas plutônicas (Fig. 19B), dois diagramas para classificação geotectônica, como proposto por Schandl e Gorton (2002) (Fig. 19E e F), o diagrama de afinidade geoquímica proposto por Peccerillo e Taylor (1976) (Fig. 19C) e um diagrama de normalização proposto por Nakamura (1974) (Fig. 19D).

De acordo com o diagrama de classificação de rochas vulcânicas proposto por De La Roche *et al.* (1980) (Fig. 19A), as metavulcânicas intermediárias apresentam composição entre as dos traquitos e as dos traquito-fonolitos e uma amostras plotada no campo dos mugearitos, ou seja, um traquiandesito basáltico rico em sódio. As metavulcânicas félsicas apresentam composição no campo dos traquitos e as metavulcânicas máficas apresentam composições no campo dos basanitos e dos fono-tefritos. Para a classificação do metagabro utilizou-se o diagrama de rochas plutônicas proposto por De La Roche *et al.* (1980) (Fig. 19B), e a composição dos metagabros é plotada nos campos dos gabros e álcali-gabros.

No diagrama proposto por Peccerillo e Taylor (1976) (Fig. 19C), as metavulcânicas intermediárias mostram-se semelhantes a composições tholeiíticas, sendo que uma delas se aproxima do campo composicional de rochas cálcio-alcálicas de alto potássio e shoshoníticas. As metavulcânicas félsicas apresentam composição no campo das séries tholeiíticas, enquanto que as metavulcânicas máficas apresentam composição no campo das séries shoshoníticas. O metagabro apresenta composição entre o campo das séries cálcio-alcálicas e o campo das séries cálcio-alcálicas de alto potássio, até composição no campo das séries shoshoníticas.

De acordo com os diagramas Th/Yb *versus* Ta/Yb e Th/Hf *versus* Yb proposto por Schandl e Gorton (2002) (Fig. 19E e F), todas as unidades apresentam pelo menos uma amostra no campo geotectônico de zonas vulcânicas intraplaca, sendo que as metavulcânicas intermediárias e as metavulcânicas félsicas apresentam uma amostra cada no campo geotectônico de margem continental ativa. As rochas metavulcânicas máficas e os metagabros apresentam uma amostra cada no campo geotectônico do MORB, e as rochas metavulcânicas intermediárias apresentam uma amostra no campo do MORB apenas no diagrama Th/Yb *versus* Ta/Yb.

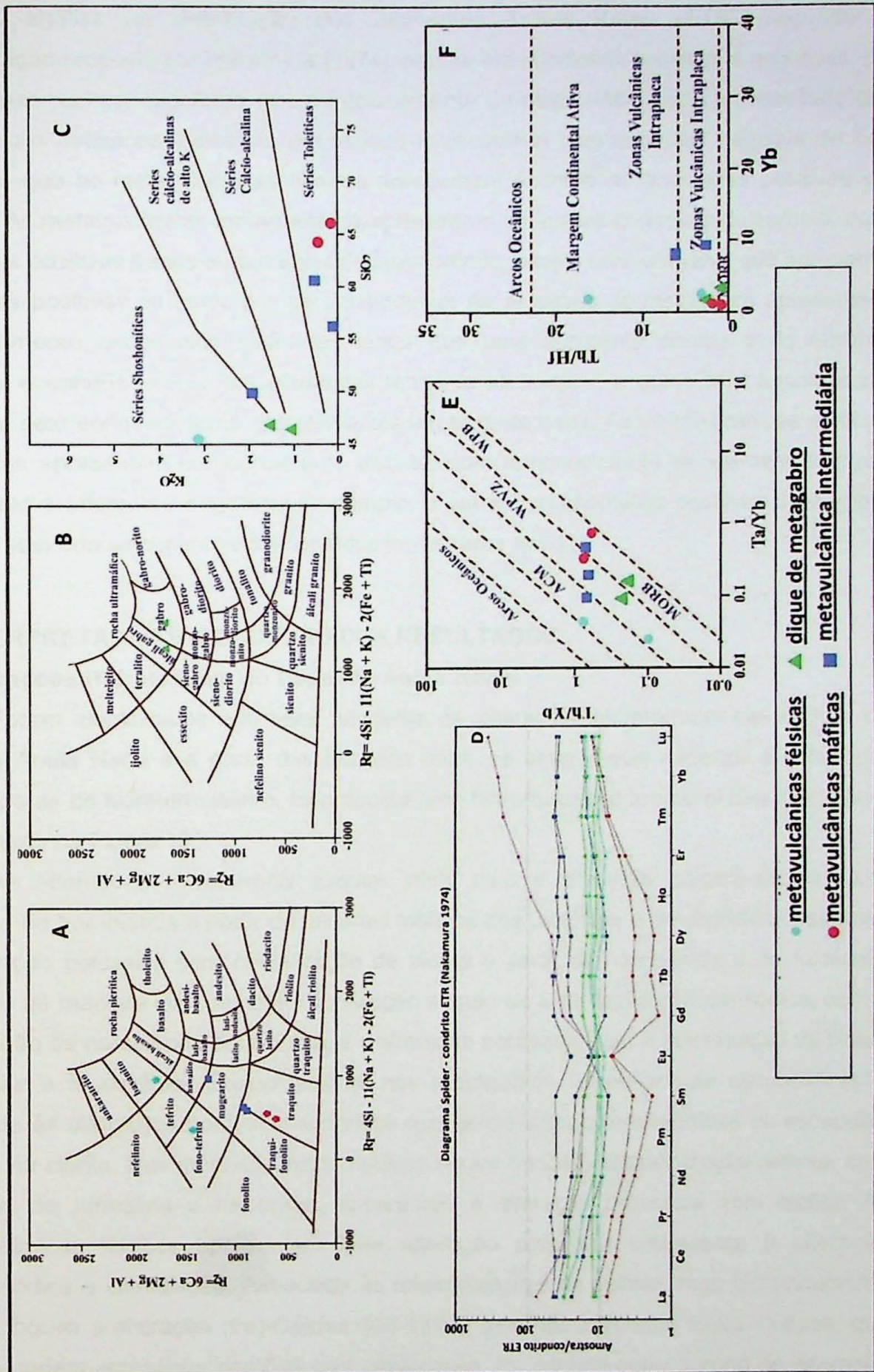


Figura 19: Características geoquímicas das unidades litológicas, e sua relação com os ambientes tectônicos de formação: (A) e (B) De La Roche *et al.* (1980); (C) Peccerillo e Taylor (1976); (D) Padrões terras raras normalizados segundo o condrito de Nakamura (1974); (E) e (F) Schandl e Gordon (2002).

A análise da distribuição dos Elementos Terras Raras (ETR), segundo a normalização proposta por Nakamura (1974), resulta em anomalias positivas e negativas, de európio nas rochas, sugerindo que o fracionamento de plagioclásio pode ter resultado em rochas mais evoluídas, deixando um resíduo mais máfico com anomalia negativa de Eu, enquanto que as metavulcânicas félsicas apresentam acentuadas anomalias positivas de európio. As metavulcânicas intermediárias apresentam anomalias negativas de európio, com anomalias positivas fracas ou ausentes de praseodímio, exceto uma amostra, que apresenta anomalias positivas de európio e de praseodímio. As amostras do metagabro apresentam comportamento geoquímico diferente, sendo que uma apresenta anomalia de európio negativa, e enriquecimento em elementos terras raras leves, e a outra sem anomalia de európio e sem enriquecimento nos elementos terras raras leves. As metavulcânicas máficas analisadas apresentam comportamento distinto, com enriquecimento de elementos terras raras leves e anomalias negativas de európio, e outra com anomalias positivas de európio fracas e sem enriquecimento em elementos terras raras leves.

5. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Alterações Hidrotermais do Depósito Antas Norte

Foram identificados oito tipos principais de alterações hidrotermais nas rochas do depósito Antas Norte e a partir das relações entre as assembleias minerais e estruturas controladoras do hidrotermalismo, foi proposta uma hierarquização temporal das alterações, apresentada na Figura 19.

As alterações hidrotermais tiveram início com a alteração cálcica-sódica, com formação de hornblenda a partir de minerais máficos dos protólitos e de oligoclásio, seguido da alteração potássica com cristalização de biotita a partir da hornblenda e de feldspato potássico de maneira mais restrita. Cloritização seguiu-se à alteração cálcica-sódica, com a substituição da hornblenda pela clorita, e a alteração potássica, com a substituição da biotita por clorita e leucoxênio. Exclusivamente nos metagabros foi observada escapolitização associada às alterações potássica e clorítica que gerou cristais xenomórficos de escapolita inclusos na clorita. Nas metavulcânicas máficas houve também turmalinização restrita, com formação de turmalina e riebeckita, superposto à alteração potássica com biotita. As metavulcânicas félsicas apresentam forte alteração propilítica sobreposta à alteração cálcica-sódica e cloritização. Associada às mineralizações de sulfeto, mas temporalmente anterior, houve a alteração (Fe)-Cálcica que afetou generalizadamente todos litotipos, que também podem apresentar porções com silicificação. No contato entre a zona de alteração (Fe)-Cálcica com os sulfetos, os anfibólios foram parcialmente substituídos por grunerita. A última fase de alteração hidrotermal corresponde a vênulas de quartzo com textura *comb*, com carbonato e hematita associados.

5.1.1 Alteração Cálcica-sódica

A alteração cálcica-sódica é representada principalmente pela presença de hornblenda, como produto da alteração de minerais máficos das encaixantes da alteração e por oligoclásio. Essa alteração é observada em todas as rochas descritas, mas é mais expressiva nas metavulcânicas máficas hidrotermalizadas e nos metagabros, provavelmente devido a composição química destas rochas..

A alteração cálcica-sódica é representada nas metavulcânicas máficas como porfiroclastos de hornblenda parcialmente ou completamente substituídos por hornblenda com textura em subgrãos. Comumente ocorrem faixas miloníticas e, locamente, o anfibólio mostra-se orientado em textura nematoblástica, indicando contemporaneidade da alteração hidrotermal com a deformação. Os porfiroclastos de hornblenda apresentam inclusões arredondadas de quartzo que tende a se orientar em alinhamentos a 90°, o que sugere terem sido formados por substituição de piroxênios.

Nos metagabros a alteração cálcica-sódica foi intensa, tendo gerado cristais idiomórficos a subidiomórficos de hornblenda, por vezes dobrados e com texturas de recristalização com formação de domínios de subgrãos, sendo interpretada como tendo ocorrido durante a deformação das rochas em zonas de cisalhamento. Posteriormente houve substituição da hornblenda pela clorita.

Nas metavulcânicas intermediárias a máficas, a alteração cálcica-sódica ocorre de maneira muito restrita, com a ocorrência de poucos cristais hornblenda subidiomórficos ou xenomórficos parcialmente substituídos por clorita e carbonato.

Nas metavulcânicas félsicas a alteração cálcica-sódica é pouco expressiva, sendo restrita à substituição da hornblenda marrom por hornblenda hidrotermal verde e pela cristalização de cristais subidiomórficos finos disseminados na rocha, parcialmente ou completamente substituídos por clorita.

A alteração cálcica-sódica parece ser a primeira fase de alterações hidrotermais do depósito, sendo em sua maior parte sin-deformacional as deformações relacionadas ao dobramento da unidade do metagabro e a deformação descrita nas metavulcânicas máficas, e apresenta caráter pervasivo.

5.1.2 Alteração Potássica

A alteração potássica é representada principalmente pela biotitização, que substitui principalmente a hornblenda. Essa alteração apresenta caráter pervasivo e, localmente, também formou feldspato potássico, principalmente nas metavulcânicas máficas.

Nas metavulcânicas máficas a biotita ocorre substituindo parcialmente a hornblenda ou como principal mineral máfico nos hornblenda-tremolita-clorita-biotita-quartzo-xistos, na forma de cristais idiomórficos associados ao feldspato potássico e ao quartzo.

Nos metagabros, a biotitização é expressiva, ocorrendo na forma de agregados de pseudomorfos de biotita cloritizados. A biotitização pode ter sido sin-deformacional em relação ao dobramento da unidade devido às dobras verificadas nos agregados dos pseudomorfos. A cloritização é pós-deformacional, como evidenciado pelos arcos poligonais de clorita idiomórficos que substituem a biotita previamente dobrada. Os pseudomorfos de biotita apresentam inclusões de escapolita, o que é interpretado como um processo de escapolitização relacionado à alteração potássica, e inclusões de pirrotita, podendo representar a substituição de anfibólio hidrotermal por biotita e pirrotita, assim como descrito em Monteiro *et al.* (2008) para os depósitos de Sequeirinho-Pista-Bahiano.

Nas metavulcânicas intermediárias a máficas a alteração potássica também ocorre pela biotitização da hornblenda, que tem associados carbonato e plagioclásio. A biotita constitui pseudomorfos de clorita e leucoxênio. O plagioclásio da rocha apresenta forte sericitização, que pode estar associada com a alteração potássica tardia, em baixa temperatura e com forte atividade de H^+ .

Nas metavulcânicas félsicas, a ocorrência de biotita é restrita a poucos pseudomorfos substituídos por clorita e leucoxênio. A cloritização da biotita é responsável pela formação do leucoxênio devido à perda de titânio da biotita, que não é incorporado facilmente na estrutura da clorita, como citado por Turpault *et al.* (1992) em rochas graníticas hidrotermalizadas.

5.1.3 Cloritização

A cloritização ocorre de maneira pervasiva ou controlada por estruturas rúpteis, onde forma vênulas e veios retilíneos e, por vezes falhados. A cloritização afeta todas as rochas descritas e, principalmente, substitui a hornblenda e a biotita.

No metagabro, a clorita é quase sempre idiomórfica e tem associada escapolita e leucoxênio. Também constitui agregados de cristais em arcos poligonais, ou é produto da alteração das bordas dos cristais de hornblenda.

Nas metavulcânicas intermediárias a máficas, a alteração pode ser pervasiva ou controlada por estruturas rúpteis (fraturas e falhas). A clorita ocorre associada à clinozoizita, plagioclásio e carbonato, e/ou na forma de pseudomorfos de biotita com leucoxênio associado. A alteração pode ser pervasiva ou controlada por estruturas rúpteis (fraturas e falhas). Nas metavulcânicas félsicas, a cloritização ocorre associada ao carbonato como produto de alteração da hornblenda, na forma de pseudomorfos de biotita associada ao leucoxênio, e ou altera o plagioclásio, na forma de cristais em arranjos radiados.

5.1.4 Alteração (Fe)–Cálcica

Essa alteração está diretamente relacionada a mineralização de sulfetos e é controlada por estruturas rúpteis, tendo formado principalmente veios, vênulas e brechas

hidrotermais. A alteração precede as mineralizações e está presente como fragmentos nas brechas mineralizadas. Apresenta como assembleia mineral característica ilmenita + apatita + hornblenda, com allanita, quartzo, plagioclásio, carbonato, clinozoizita e epidoto subordinados.

A apatita e a ilmenita ocorrem associadas à hornblenda, como cristais intercrescidos ou inclusos, e representam os primeiros minerais a se cristalizarem nessa fase da alteração hidrotermal. A hornblenda apresenta hábito plumoso ou idiomórfico, e pode formar cristais muito grossos, mas varia até a granulação média. O contato do sulfeto com a hornblenda pode apresentar epidoto, clinozoizita e plagioclásio. A ocorrência de cristais grossos de allanita indica um conteúdo de elementos terra rara associados ao fluido responsável pela alteração.

Essa alteração gerou também agregados de cristais de pargasita, onde o contato com os sulfetos é marcado por uma borda de hornblenda.

5.1.5 *Gruneritização*

A gruneritização é restrita ao contato entre a hornblenda da alteração (Fe)-Cálcica e os sulfetos. Ela é marcada por cristais de hornblenda zonados, com núcleos de hornblenda e bordas de grunerita, podendo estar completamente substituídos.

5.1.6 *Alteração Propilítica*

As rochas metavulcânicas félsicas hidrotermalizadas apresentam uma alteração hidrotermal com assembleia característica de plagioclásio + carbonato + clorita + clinozoizita com apatita e ilmenita subordinados. Essa alteração ocorre na forma de bolsões irregulares ou vênulas. O plagioclásio apresenta forte sericitização e cloritização, e a hornblenda é substituída por carbonato, clorita ou epidoto e clinozoizita nessas rochas.

5.1.7 *Turmalinização*

A turmalinização é restrita as rochas metavulcânicas máficas e é marcada pela presença de vênulas descontínuas com sobrecrecimento de turmalina idiomórfica marrom nos minerais da encaixante. Os cristais de tremolita apresentam substituição parcial por anfibólio azul (riebeckita) próximos a ocorrência de turmalina, e o anfibólio azul é parcialmente substituído por biotita.

5.1.8 *Silicificação*

Foram identificadas duas fases principais de silicificação, sendo uma relacionada a alteração (Fe)-Cálcica, identificada principalmente como fragmentos granoblásticos de quartzo nas brechas de sulfetos e ou associados à ilmenita + apatita + hornblenda, e uma

fase tardia em relação a mineralização, com veios de quartzo com textura *comb* e associação com carbonatos e hematita.

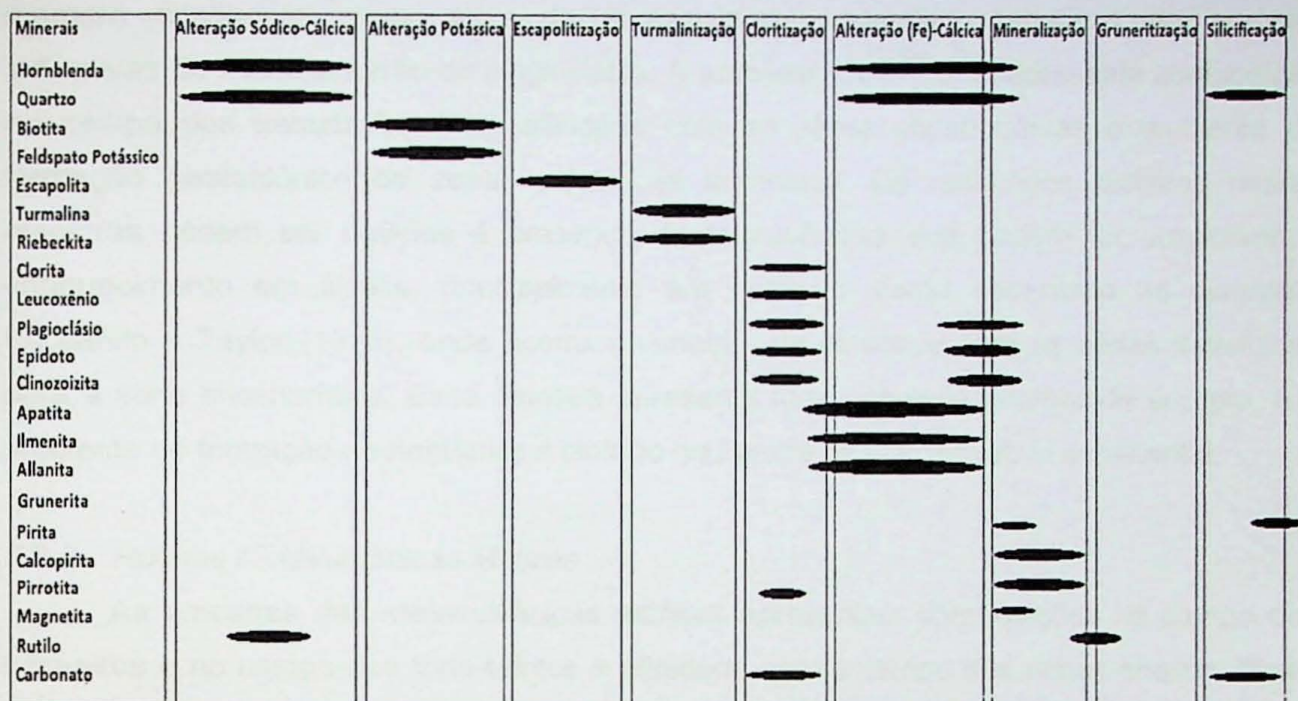


Figura 20: Relação entre as alterações hidrotermais e a formação dos minerais associados.

5.2 Litoquímica

5.2.1 Rochas Metavulcânicas Félsicas

As rochas analisadas apresentam composição no campo dos traquitos, com comportamento geoquímico equivalente as séries tholeiíticas. Os ambientes geotectônicos seriam predominantemente de zonas vulcânicas intraplaca, mas com algumas características de MORB em algumas das intrusivas máficas. Uma melhor avaliação baseada num maior número de amostras seria necessária, pois algumas das características de ambiente intraplaca e de alcalinidade devem, pelo menos em parte, serem devidas às alterações hidrotermais pervasivas que afetaram as rochas. Entretanto, o conjunto das análises parece favorecer uma formação de rochas intrusivas e vulcânicas em ambiente de intraplaca, com magmas relativamente sódicos, tais quais aqueles que geram os mugeritos. A tipologia de MORBs, como encontrado em alguns gabros não é rara em diques e o próprio contexto geológico das amostras exclui a possibilidade deste tipo de ambiente tectônico.

As rochas metavulcânicas félsicas apresentam anomalias positivas de európio e estão presentes enriquecimentos relativos de terras raras leves, indicando processos não intensos de fracionamentos magmáticos. Amostras com enriquecimentos em terras raras pesadas indicam magmas residuais com acumulação de anfibólio e/ou granada.

5.2.2 *Rochas Metavulcânicas Intermediárias*

As metavulcânicas intermediárias apresentam composição de traquito e mugearito e ambiente geotectônico de formação predominantemente de intraplaca, com gradação para margem continental ativa, além de apresentarem anomalias negativas de európio, indicativas de fracionamento de plagioclásio. A amostra AAND-15-VI apresenta composição no campo dos traquito-fonolitos, afinidade com as séries shoshoníticas e ambiente de formação geotectônico de zonas vulcânicas intraplaca. Os resultados distintos nestas amostras podem ser devidos à presença de microvênulas que podem ter propiciado o enriquecimento em álcalis, principalmente em potássio, como observado no diagrama Peccerillo e Taylor (1976), onde ocorre a variação da afinidade com as séries tholeiíticas para a série shoshonítica. Essa amostra apresenta forte anomalia positiva de európio, e o ambiente de formação geotectônico é plotado no campo de margem ativa continental.

5.2.3 *Rochas Metavulcânicas Máficas*

As amostras das metavulcânicas máficas apresentam composições no campo dos basanitos e no campo dos fono-tefritos e afinidade com o campo das séries shoshoníticas. O ambiente de formação geotectônico foi interpretado como zonas vulcânicas intraplaca com gradação para margem continental ativa. A amostra AAND-57-VIII, corresponde a uma porção com hidrotermalismo associado, próxima a mineralização de sulfetos. Esta amostra apresenta anomalia positiva fraca de európio e enriquecimento em elementos terras raras leves, além de estar empobrecida em elementos terras raras pesados em relação a amostra AAND-57-VII, sem alteração hidrotermal.

5.2.4 *Metagabro*

A composição dos metagabros varia do campo dos gabros e dos gabros alcalinos, com afinidade as séries cálcio-alcalinas e cálcio-alcalinas de alto potássio, até composição no campo das séries shoshoníticas. Os metagabros apresentam campo geotectônico no MORB e em zonas vulcânicas intraplaca. A amostra com anomalias de európio negativas apresenta enriquecimento em elementos terras raras em relação a amostra sem anomalia de európio.

6. CONCLUSÕES

O trabalho realizado permitiu a caracterização e hierarquização das alterações hidrotermais presentes no depósito de Cu-Au Antas Norte, e a comparação com os depósitos de IOCGs da Província Mineral de Carajás.

As unidades descritas no depósito Antas Norte correspondem as metavulcânicas máficas hidrotermalizadas (biotita-hornblenda-quartzo xistos e hornblenda-tremolita-clorita-biotita-quartzo xistos porfiroclásticos com turmalina), metavulcânicas félsicas

hidrotermalizadas (quartzo + oligoclásio + carbonato + ilmenita, com alteração hidrotermal em bolsões com assembleia mineral de oligoclásio + carbonato + clorita + clinozoizita com apatita, minerais opacos e zircão subordinados), metagabros (hornblenda-quartzo anfibolitos e escapolita-clorita-plagioclásio-quartzo-hornblenda anfibolito com epidoto, clinozoizita e allanita como minerais acessórios), metavulcânicas intermediárias a máficas hidrotermalizadas (hornblenda + oligoclásio + carbonato + clorita + clinozoizita + epidoto + quartzo com allanita e apatita como minerais acessórios).

As alterações hidrotermais são reconhecidas em todas as unidades descritas, começando com a alteração sódico-cálcica, com caráter pervasivo e contemporânea às deformações miloníticas e cataclásticas descritas nos metagabros e nas metavulcânicas máficas, com formação de hornblenda a partir de minerais máficos dos protólitos e de oligoclásio, seguido da alteração potássica, de caráter pervasivo e sin-deformacional ao dobramento no metagabro, caracterizada principalmente pela biotização dos anfibólios da alteração sódico-cálcica e cristalização de feldspato potássico de maneira mais restrita. A cloritização seguiu-se à alteração cálcica-sódica, com estilo fissural e pervasivo, com a substituição da hornblenda pela clorita, e a alteração potássica, com a substituição da biotita por clorita e leucoxênio, e caráter pós-deformacional em relação ao dobramento do metagabro evidenciado pela formação de arcos poligonais de cristais idiomórficos de clorita sobre o dobramento. Exclusivamente nos metagabros foi observada escapolitização associada às alterações potássica e clorítica. Turmalinização restrita as metavulcânicas máficas, com formação de turmalina e ribeckita, superposto à alteração potássica. As metavulcânicas félsicas apresentam forte alteração propilítica sobreposta à alteração cálcica-sódica e cloritização. Associada às mineralizações de sulfeto, mas temporalmente anterior, houve a alteração (Fe)-Cálcica com silicificação, caracterizada principalmente pela associação hornblenda + apatita + ilmenita, que afetou generalizadamente todos litotipos com estilo de alteração fissural. No contato entre a zona de alteração (Fe-Cálcica) com os sulfetos, os anfibólios foram parcialmente substituídos por grunerita. A última fase de alteração hidrotermal corresponde a vênulas de quartzo com textura *comb*, com carbonato e hematita associados.

As mineralizações ocorrem como vênulas, veios e brechas, e são compostas principalmente por calcopirita, podendo ocorrer pirrotita associada e pirita subordinada. A calcopirita ocorre como fase inicial da mineralização, associada à pirita idiomórfica, podendo ser brechada ou cortada por vênulas de pirrotita, e a pirita ocorre geralmente como produto da interação entre a calcopirita e/ou a pirrotita com a ganga. A última fase de mineralização está associada ao preenchimento de fraturas por pirita dendrítica, por vezes associada a silicificação tardia.

O depósito Antas Nortes apresenta diversas características em comum com os depósitos IOCGs da Província Mineral de Carajás, sendo elas: (1) As rochas hospedeiras

das alterações hidrotermais pertencem ao Supergrupo Itacaiúnas; (2) Há uma relação espacial das alterações hidrotermais e das mineralizações com zonas de cisalhamento e intrusões de gabros (Metagabros) em rochas metavulcânicas máficas, intermediárias e félsicas; (3) Houve intensa alteração hidrotermal, com alteração sódica-cálcica inicial sobreposta pela alteração potássica, com cloritização subsequente e mineralização em sulfetos. As inclusões fluidas observadas nas lâminas mostram relações de líquido-vapor muito variadas, distintas proporções de $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ e salinidade muito diversificadas, com inclusões com helots abundantes e sem sais, indicando a diversidade de fluidos envolvidos no processo de alteração hidrotermal.

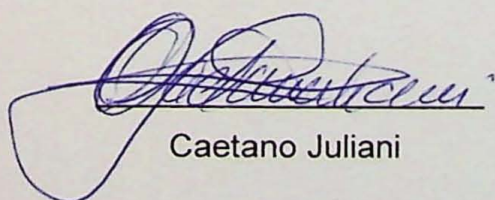
As características apresentadas como diagnósticas de depósitos IOCGs segundo Williams *et al.* (2005) são parcialmente atendidas na mineralização de Antas Norte, sendo elas: (1) Cobre, com ou sem ouro, como principal metal para aproveitamento econômico; (2) Minério hidrotermal e forte controle estrutural na formação dos corpos de minérios. As outras características, entre elas, ocorrência de magnetita e/ou hematita abundantes e óxidos de ferro com razões de Fe/Ti relativamente maiores que aquelas encontradas na maioria das rochas ígneas e da composição média da crosta, não são atendidas, uma vez que o depósito apresenta como principal óxido de ferro a ilmenita, caracterizando uma mineralização do tipo IOCG distinta, com estado de oxidação mais reduzido do que o observado em mineralizações IOCGs clássicas, o que certamente faz por mercer estudos mais detalhados desta mineralização, face ao seu potencial para exploração mineral na Província Mineral de Carajás

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

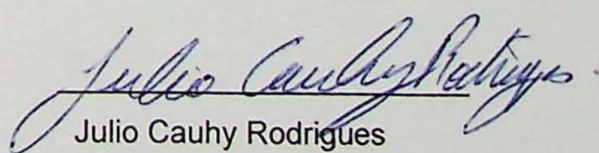
- De La Roche H., Leterrier J., Grand Claude P, Marchal M. 1980. *A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2- diagram and major elements analyses- Its relationship with current nomenclature*. Chemical Geology, 29(1-4): 183-106.
- DOCEGEO (1988). Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. 35º Congresso Brasileiro de Geologia, 35, 11-54. Belém: SBG.
- Feio, G.R.L. (2011). *Magmatismo Granitóide Arqueano da área de Canaã dos Carajás: Implicações para a evolução crustal da Província Carajás*. Tese (Doutorado). Pará: Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T. (1992). Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58, 241-287.
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.E., Lindenmayer, D. (1991). U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajas area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49, 329-354.
- Melo, G.H.C., Monteiro, L.V.S., Moreto, C.P.N., Xavier, R.P., Silva, M.A.D. (2014). Paragenesis and evolution of the hydrothermal Bacuri iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Province (PA). *Brazilian Journal of Geology*, 44, 73-90.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., Filho, C.R.S., Torresi, I. (2008). Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. *Miner Deposita*, 43, 129-159.

- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Filho, C.R.S., Moreto, C.P.N. (2014). Metalogenia da Província Carajás. In: Silva, M. G., Neto, M. B. C., Jost, H., Kuyumjian, R. M. (Org.), *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras* (43-92). CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Amaral, W.S., Santos, T.J.S., Juliani, C., Filho, C.R.S. (2011). Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. *Miner Deposita*, 46, 789-811.
- Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Creaser, R.A., Dufrane, S.A., Tassinari, C.C.G., Sato, K., Kemp, A.I.S., Amaral, W.S. (2015) Neoarchean and Paleoproterozoic Iron Oxide-Copper-Gold Events at the Sossego Deposit, Carajás Province, Brazil, Re-Os and U-Pb Geochronological Evidence. *Economic Geology*, 110: 809-835.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et cosmochimica Acta*, 38, 757-775.
- Peccherillo A. e Taylor S.R. 1976. *Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey*. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58: 63-81.
- Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes and mineral systems. New York: Springer-Verlag
- Réquia, K., Stein, H., Fontboté, L., Chiaradia, M. (2003) Re-Os and Pb-Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil: *Mineralium Deposita*, 38: 727-738
- Schandl E.S & Gorton M.P. 2002. *Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments*. *Economic Geology*, 97: 629-642.
- Tallarico, F.H.B., Figueiredo, B.R., Groves, D.I., Kositsin, N., McNaughton, N.J., Fletcher I.R., Rego J.L. (2005) Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: an Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization: *Economic Geology*, 100: 7-28.
- Tröger, W.E. (1979). *Optical determination of rock-forming minerals*. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Turpault, M.-P.; Berger, G.; Meunier, A. (1992) Dissolution-precipitation processes induced by hot water in a fractured granite. Part 1: Wall-rock alteration and vein deposition processes. *Eur. J. Mineral.*, 4: 1457-1475.
- Vasquez, M.L., Rosa-Costa, L.T. (Org.). (2008). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do Estado do Pará: Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil*. Belém: CPRM/CIAMA-PA.
- Williams, P.J., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., Haller, A., Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R. (2005). Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space-Time Distribution, and Possible Modes of Origin. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 371-405.
- Xavier, R.P., Monteiro, L.V.S., Moreto, C.P.N., Pestilho, A.L.S., Melo, G.H.C., Silva, M.A.D., Aires, B., Ribeiro, C., Freitas, F.H.S. (2012). The Iron Oxide Copper-Gold Systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. *Economic Geology, publicação especial*, v.16.

De acordo,



Caetano Juliani



Julio Cauhy Rodrigues

ANEXO 1 LITOQUÍMICA

AMOSTRA	LITOLOGIA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
IV-CARB	Carbonatito	4,39	1,1	2,86
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	49,7	15,8	10,2
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	56,2	17,7	6,65
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	60,3	20,8	2,43
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	65,9	20,2	1,12
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	64,1	20,6	0,88
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	44,3	11,9	14,4
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	45,1	15,85	12,95
AAND-69-IX	Metagabro	46,2	15,05	12,8
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado	46,4	15,35	13,55
		CaO	MgO	Na ₂ O
AMOSTRA	LITOLOGIA	50,8	0,94	0,25
IV-CARB	Carbonatito	6,87	4,4	4,49
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	4,13	2,72	8,09
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	4,53	0,53	8,96
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	2,14	0,08	10,75
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	2,89	0,04	10,05
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	10,5	8,33	2,74
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	7,16	6,08	4,27
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	9,59	7,34	3,32
AAND-69-IX	Metagabro	9,41	7,7	2,27
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
AMOSTRA	LITOLOGIA	0,19	<0,01	0,04
IV-CARB	Carbonatito	1,9	0,04	1,05
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	0,04	0,03	1,13
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	0,51	0,01	1,21
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	0,14	<0,01	0,3
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	0,49	<0,01	0,6
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	2,67	0,03	0,67
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	3,13	0,05	0,76
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	1,06	0,04	0,9
AAND-69-IX	Metagabro	1,47	0,04	0,92
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		MnO	P ₂ O ₅	SrO
AMOSTRA	LITOLOGIA	0,08	0,04	0,01
IV-CARB	Carbonatito	0,06	0,1	0,01
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	0,06	0,06	0,01
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	0,03	0,02	0,01
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	0,01	0,01	0,01
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	0,03	<0,01	0,01
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,05	0,09	0,01
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	0,04	0,01	0,01
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	0,12	0,07	0,01
AAND-69-IX	Metagabro	0,19	0,08	0,01
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			

AMOSTRA	LITOLOGIA	BaO	LOI	Total
IV-CARB	Carbonatito	<0.01	38,3	99
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	0,04	3,48	98,14
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	<0.01	3,08	99,9
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	<0.01	2,42	101,76
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	<0.01	1,14	101,8
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,01	1,54	101,24
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	0,03	3,58	99,3
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	0,03	1,56	97
AAND-69-IX	Metagabro	0,02	1,59	98,11
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado	0,01	2,16	99,56
		C	S	Ba
AMOSTRA	LITOLOGIA	10,9	0,6	20,3
IV-CARB	Carbonatito	0,3	<0.01	311
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	0,4	0,01	9,8
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	0,33	0,02	28,2
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	0,14	0,01	32,9
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	0,2	<0.01	127,5
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,66	0,08	224
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	0,17	<0.01	286
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	0,18	0,04	191,5
AAND-69-IX	Metagabro	0,08	0,15	133,5
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		Ce	Cr	Cs
AMOSTRA	LITOLOGIA	31,4	30	0,17
IV-CARB	Carbonatito	35,7	280	0,07
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	26,3	230	0,04
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	14,4	50	0,04
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	7,1	20	0,02
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	5,1	20	0,15
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	17,8	240	2,42
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	8,9	340	2,6
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	23,5	270	0,38
AAND-69-IX	Metagabro	10,9	270	0,28
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		Dy	Er	Eu
AMOSTRA	LITOLOGIA	15,9	30,4	0,76
IV-CARB	Carbonatito	12,65	8	1,91
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	8,48	7,07	0,91
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	2,69	2,7	1,07
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	1,09	1,2	0,52
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	0,59	0,99	0,49
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	3,1	1,88	0,86
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	4,16	2,87	0,66
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	5,04	3,53	0,96
AAND-69-IX	Metagabro	3,83	2,49	0,8
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			

AMOSTRA	LITOLOGIA	Ga	Gd	Ge
IV-CARB	Carbonatito	3,7	8,86	<5
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	20,5	11,8	<5
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	16,7	6,91	<5
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	15,6	2,29	<5
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	19,3	0,84	<5
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	17,3	0,41	<5
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	17	3,21	<5
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	20,8	3,25	<5
AAND-69-IX	Metagabro	18,6	4,67	<5
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado	20,3	3,19	<5
		Hf	Ho	La
AMOSTRA	LITOLOGIA	0,2	6,34	25,2
IV-CARB	Carbonatito	3,9	2,71	14,4
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	4	2,02	13,1
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	4,2	0,64	8
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	19,9	0,26	3,9
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	23,3	0,16	2,6
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,9	0,64	10,5
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	1	0,96	3,7
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	1,7	1,07	10,1
AAND-69-IX	Metagabro	1,7	0,78	4
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		Lu	Nb	Nd
AMOSTRA	LITOLOGIA	12,35	0,5	11,2
IV-CARB	Carbonatito	1,26	15,8	24,7
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	1,36	23	15
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	0,6	22,5	5,8
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	0,44	10,8	2,9
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	0,44	12,9	2
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,41	2	7,3
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	0,53	2,4	5,7
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	0,56	13,2	12,9
AAND-69-IX	Metagabro	0,35	2,6	7,3
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		Pr	Rb	Sm
AMOSTRA	LITOLOGIA	2,81	9,9	3,34
IV-CARB	Carbonatito	5,29	56,6	8,12
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	3,35	1	4,34
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	1,5	24,3	1,51
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	0,74	6,1	0,69
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	0,54	24,3	0,37
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	1,91	191,5	1,89
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	1,19	215	1,94
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	3,01	71,5	3,27
AAND-69-IX	Metagabro	1,41	155	2,1
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			

AMOSTRA	LITOLOGIA	Sn	Sr	Ta
IV-CARB	Carbonatito	1	139,5	<0.1
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	6	83,7	0,8
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	3	78,6	1,6
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	2	172	1,7
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	1	90,5	0,8
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	<1	120	1,2
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	2	73,4	0,1
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	3	106,5	0,1
AAND-69-IX	Metagabro	4	107	0,6
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado	1	112	0,2
		Tb	Th	Tm
AMOSTRA	LITOLOGIA	1,89	0,33	6,62
IV-CARB	Carbonatito	2,06	5,18	1,3
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	1,29	4,96	1,23
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	0,39	2,18	0,45
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	0,16	1,55	0,24
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	0,09	0,96	0,22
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,54	1,67	0,32
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	0,65	0,35	0,44
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	0,79	0,68	0,54
AAND-69-IX	Metagabro	0,61	0,55	0,37
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		U	V	W
AMOSTRA	LITOLOGIA	0,15	19	1
IV-CARB	Carbonatito	2,3	164	1
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	2,38	97	1
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	1,59	26	2
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	4,54	<5	1
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	4,55	5	1
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,68	203	1
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	0,17	265	1
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	0,5	280	1
AAND-69-IX	Metagabro	0,15	280	2
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		Y	Yb	Zr
AMOSTRA	LITOLOGIA	229	58,2	5
IV-CARB	Carbonatito	76,2	8,45	158
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	61,5	8,82	168
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	22,4	3,41	176
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	9,2	2,3	744
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	6,1	2	835
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	18,7	2,13	30
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	26,1	3,29	31
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	31,1	3,53	59
AAND-69-IX	Metagabro	22,2	2,35	60
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			

AMOSTRA	LITOLOGIA	As	Bi	Hg
IV-CARB	Carbonatito	0,1	0,01	0,022
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	<0.1	<0.01	0,007
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	<0.1	<0.01	0,016
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	0,2	<0.01	0,009
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	<0.1	<0.01	0,005
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,1	<0.01	0,005
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	<0.1	<0.01	0,006
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	<0.1	<0.01	0,006
AAND-69-IX	Metagabro	0,2	<0.01	0,006
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado	0,9	<0.01	0,014
		In	Re	Sb
AMOSTRA	LITOLOGIA	0,079	0,023	<0.05
IV-CARB	Carbonatito	0,044	0,001	<0.05
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	0,01	0,001	<0.05
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	<0.005	0,001	<0.05
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	<0.005	<0.001	<0.05
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	<0.005	<0.001	<0.05
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,016	<0.001	<0.05
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	0,02	<0.001	<0.05
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	0,021	0,001	<0.05
AAND-69-IX	Metagabro	0,027	0,001	<0.05
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		Se	Te	Tl
AMOSTRA	LITOLOGIA	3,5	0,51	0,03
IV-CARB	Carbonatito	0,5	<0.01	<0.02
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	<0.2	<0.01	<0.02
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	<0.2	<0.01	<0.02
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	<0.2	<0.01	<0.02
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	<0.2	<0.01	<0.02
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	0,6	0,03	0,12
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	0,2	<0.01	0,12
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	0,2	0,04	<0.02
AAND-69-IX	Metagabro	0,4	<0.01	0,05
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			
		Ag	Cd	Co
AMOSTRA	LITOLOGIA	<0.5	<0.5	16
IV-CARB	Carbonatito	<0.5	<0.5	35
II-ANDG-03	Metavulcânica Intermediária	<0.5	<0.5	21
I-ANDG-03 (I)	Metavulcânica Intermediária	<0.5	<0.5	7
II-ANDG-03 (II)	Metavulcânica Intermediária	<0.5	<0.5	3
VI-AAND-57	Metavulcânica Félsica Hidrotermalizada	<0.5	<0.5	2
V-AAND-57	Metavulcânica Félsica	<0.5	<0.5	54
VIII-AAND-57	Metavulcânica Máfica	<0.5	<0.5	50
VII-AAND-57 (I)	Metavulcânica Máfica Hidrotermalizada	<0.5	<0.5	43
AAND-69-IX	Metagabro	<0.5	<0.5	54
X-AAND-69	Metagabro Hidrotermalizado			

DOAÇÃO Graduação
IGC
Data: 20 / 03 / 18

DOAÇÃO Graduação
1GC

Data: 20/03/18

