



Universidade Federal do Pará



Faculdade de Geologia



Instituto de Geociências

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SULSIENE MACHADO DE SOUZA

PETROGRAFIA E MINERALOGIA DE EPISSIENITOS POTÁSSICOS
ESTANÍFEROS E DA ALTERAÇÃO HIDROTERMAL ASSOCIADA,
NA BORDA OESTE DO ALBITA-GRANITO, SUÍTE MADEIRA,
PROVÍNCIA PITINGA (AM)

GEOCIÊNCIAS
U F P A

BELÉM - PARÁ
MARÇO - 2012

SULSIENE MACHADO DE SOUZA

PETROGRAFIA E MINERALOGIA DE EPISSIENITOS POTÁSSICOS
ESTANÍFEROS E DA ALTERAÇÃO HIDROTERMAL ASSOCIADA,
NA BORDA OESTE DO ALBITA-GRANITO, SUÍTE MADEIRA,
PROVÍNCIA PITINGA (AM).

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), como requisito de cumprimento às exigências para obtenção do grau de Geólogo - Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Régis Munhoz Krás Borges.

BELÉM - PARÁ
MARÇO - 2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

S725p Souza, Sulsiene Machado de

Petrografia e mineralogia de epissienitos potássicos estaníferos e da alteração hidrotermal associada, na Borda Oeste do albita-granito, suíte Madeira, Província Pitinga (AM) / Sulsiene Machado de Souza; Orientador: Régis Munhoz Krás Borges – 2012

122 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2012.

1. Petrologia – Amazonas (AM). 2. Mineralogia. 3. Processos hidrotermais. 4. Epissienitos potássicos. 5. Cassiterita. 6. Província Pitinga. I. Borges, Régis Munhoz Krás, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22ª ed.: 552.098113

SULSIENE MACHADO DE SOUZA

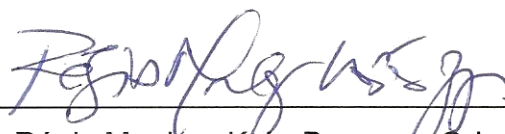
PETROGRAFIA E MINERALOGIA DE EPISSIENITOS POTÁSSICOS
ESTANÍFEROS E DA ALTERAÇÃO HIDROTERMAL ASSOCIADA,
NA BORDA OESTE DO ALBITA-GRANITO, SUÍTE MADEIRA,
PROVÍNCIA PITINGA (AM).

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geologia do
Instituto de Geociências da Universidade
Federal do Pará (UFPA), como requisito
de cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Geólogo - Bacharel
em Geologia.

Data de Aprovação: ___/___/___

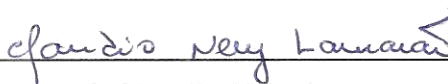
Conceito: _____

Banca Examinadora:



Prof. Régis Munhoz Kras Borges – Orientador

Doutor em Geologia
Universidade Federal do Pará



Prof. Claudio Nery Lamarão – Membro

Doutor em Geologia
Universidade Federal do Pará



Hilton Tulio Costi – Membro

Doutor em Geologia
Museu Paraense Emílio Goeldi

*À minha família,
meu porto seguro e a razão de tudo.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida, e por ter me dado discernimento, sabedoria e força pra chegar até aqui;

À minha família, principalmente aos meus pais, Antônio Carlos e Maria Elza, que sempre deram tudo de si para os filhos, e por sempre me incentivarem durante os estudos. Meus irmãos Mayara e Marco, que sempre estiveram comigo, e a todos os outros familiares que acreditaram em mim;

À Universidade e ao Instituto, por proporcionar, através do fornecimento de equipamentos e instalações, a realização das atividades;

Ao professor e orientador Régis Borges pela ajuda e dedicação, pela paciência e cuidado nas correções, e por todo o incentivo na elaboração deste trabalho;

Ao professor Claudio Lamarão, pela ajuda com o MEV, e por sempre se preocupar com o desenvolvimento do trabalho;

Ao Dr. Hilton Costi, pelas valiosas dicas e conselhos;

Ao professor Rômulo Angélica, pela ajuda com a difração de raios-X;

Ao professor Marcondes Costa, pela orientação nos primeiros anos de curso através da oportunidade concedida no programa de bolsas de produtividade e pesquisa;

Aos demais professores do Instituto de Geociências pelos ensinamentos e contribuições ao meu trabalho, e pelos conhecimentos a mim transmitidos no decorrer do curso;

À Dra. Telma Faraco, sempre amiga, exemplo de dedicação, compreensão e empenho;

Ao meu companheiro e amigo Valber, por sempre me incentivar nos momentos difíceis, e aos meus amigos Nayan, Anderson e Camila, pelas produtivas e divertidas horas trabalhando em conjunto;

À Ana Paula Linhares, pelo carinho e amizade, por sempre se dispor a me ajudar;

A todos os amigos que fiz ao longo desses cinco anos de Curso, em especial os da turma de geologia de 2007, pelos bons momentos que passamos juntos, aprendendo uns com os outros, nos altos e baixos da geologia.

RESUMO

A Província Pitinga, localizada na região nordeste do Estado do Amazonas, é a maior produtora de estanho do Brasil. O estudo petrográfico de amostras do furo de sondagem 250S/1200W, que intercepta uma zona de contato entre as fácies albita-granito de borda (ABGB) e feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico (FAGHP) na borda oeste do plúton Madeira, permitiu a caracterização de três tipos de rocha: 1) feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico; 2) albita-granito de borda epissienitizado (AGbEp) e 3) granito epissienitizado híbrido (GEpsH). O FAGHP é composto principalmente por fenocristais de feldspato alcalino perítico e quartzo, imersos em uma matriz quartzo-feldspática, e proporções acessórias de biotita, zircão, fluorita, hematita, pirita e galena. A rocha ocorre, por vezes, levemente albitizada, greisenizada ou epissienitizada. O AGbEp é composto principalmente de quartzo e feldspato alcalino, além de quantidades subordinadas de cassiterita, zircão, torita, fluorita, sericita e fengita, e ocasionalmente mostra-se enriquecido em sulfetos. O GEpsH tem textura porfirítica e é composto basicamente por feldspato alcalino e quartzo, e quantidades acessórias de zircão, fluorita, hematita, pirita, galena, torita e cassiterita, e encontra-se intensamente hematitizado e silicificado. O principal processo hidrotermal identificado neste estudo é a epissienitização potássica, que modificou significativamente as rochas deste setor. Outros processos também foram caracterizados, como a albitização, greisenização, sulfetação, silicificação e hematitização, cada um deles contribuindo de uma forma específica para a formação das rochas epissienitizadas. O estágio mais precoce da epissienitização foi a desquartzificação das rochas graníticas, responsável pela lixiviação do quartzo e geração de cavidades que, interconectadas, possibilitaram a circulação dos fluidos durante toda a atividade hidrotermal. O metassomatismo potássico causou a dissolução total da albita do ABGB, bem como sua substituição por microclínio hidrotermal. O feldspato alcalino magmático foi parcialmente substituído por filossilicatos, principalmente no estágio de greisenização. De forma mais restrita, o feldspato alcalino perítico do FAGHP foi parcialmente substituído por albita, principalmente nas bordas dos cristais. O granito epissienitizado híbrido é composto por fases minerais herdadas das duas fácies petrográficas e é o litotipo mais representativo da interação entre os dois líquidos magmáticos na região estudada. Nele, além do microclínio formado em condições *subsolvus* (ABGN),

ocorre uma população de cristais mais finos de microclínio hidrotermal, geralmente ocupando os interstícios entre as fases magmáticas. O minério estanífero associado a estas rochas é representado tanto por cristais de cassiterita provenientes do ABGB, quanto por cristais formados pela atividade hidrotermal, conforme os estudos de caracterização mineralógica e textural realizados por MEV-CL-EDS. Os cristais de cassiterita que preenchem fraturas e/ou cavidades nas rochas epissienitizadas são mais puros e relativamente mais pobres em Nb do que aqueles formados no estágio magmático. Os fluidos envolvidos na epissienitização potássica devem ter sido alcalinos e subsaturados em sílica para ter induzido a desquartzificação, mas com baixo grau de alcalinidade, já que fluidos altamente alcalinos tenderiam a promover metassomatismo sódico, com estabilização da albita. Com base nos dados obtidos neste estudo e no contexto geológico da região, propõem-se duas hipóteses para a origem de um fluido alcalino, oxidado e enriquecido em K: (1) por separação de uma fase fluida a partir do líquido magmático formador do FAGHP e (2) pela ação do mesmo fluido que desencadeou o processo de autometassomatismo do albita-granito de núcleo. Independentemente da origem, este fluido provavelmente teria sido modificado ao longo do resfriamento do sistema, culminando com os processos de sulfetação, hematitização e silicificação, quando ocorre o preenchimento de cavidades e fraturas por sulfetos de Fe, Cu, Pb e Zn, hematita e quartzo, associados a cassiterita em algumas situações. Os cristais de cassiterita formados durante o processo de epissienitização são compostos quase que exclusivamente por SnO₂.

Palavras-chave: Petrologia – Amazonas (AM). Mineralogia. Processos hidrotermais. Epissienitos potássicos. Cassiterita. Província Pitinga.

ABSTRACT

The Pitinga Province, located in the northeastern region of the Amazonas state, is the largest tin producer in Brazil. The petrographic study in the drill cores from the borehole 250S/1200W, which intercepts the contact zone between border albite-rich granite (ABGB) and porphyritic hypersolvus alkali feldspar granite (FAGHP), in the western part of the Madeira pluton, allowed the characterization of three rock types: 1) porphyritic hypersolvus alkali feldspar granite, 2) episyenitized border albite-rich granite (AGbEp) and 3) hybrid episyenitized granite (GEpsH). The FAGHP is composed mainly by phenocrysts of perthitic alkali feldspar and quartz, embedded in a fine quartz-feldspar matrix, and accessory contents of zircon, fluorite, hematite, pyrite and galena. It locally occurs slightly albitized, greisenized or episyenitized. The AGbEp is composed mainly by quartz and alkali feldspar, and subordinate cassiterite, zircon, thorite, fluorite, sericite and phengite, and in some places shows sulfides enrichment. The GEpsH have porphyritic texture, and consists primarily of alkali feldspar and quartz, and accessory amounts of zircon, fluorite, hematite, pyrite, galena, thorite and cassiterite, and is intensively hematitized and silicificated. The main hydrothermal process identified in this study is the potassic episyenitization, which modified significantly the rocks of the region. Other processes were also characterized, such as albitization, greisenization, sulfidation, silicification and hematitization, and all of these contributed to the formation of the episyenitized rocks. The early alteration stage of potassic episyenitization was the dequartzification of granitic rocks, which induced the quartz leaching and the vugs formation. The intensive fluid circulation during all the hydrothermal activity was triggered by connection of these cavities. The complete dissolution of albite crystals from ABGB, as well as its replacement by hydrothermal microcline, was caused by potassic metassomatism. The magmatic alkali feldspar was partially replaced by phyllosilicates, mainly at greisenization stage. In some places, the perthitic alkali feldspar phenocrysts of the porphyritic hypersolvus alkali feldspar granite are partially replaced by albite at the margins. The hybrid episyenitized granite is composed by mineral phases inherited from both granitic facies (ABGB and FAGHP), and is the more representative rock of the interaction (mingling?) between the two magmatic liquid. Besides the microcline formed in subsolvus conditions, this rock contains a fine population of hydrothermal microcline crystals, which generally filling open

spaces among the magmatic minerals. The Sn orebody associated to these rocks is composed by both magmatic cassiterite crystals derived from the ABGB and crystals precipitated from hydrothermal fluids, as demonstrated by mineralogical and textural features obtained by MEV-CL-EDS studies. The cassiterite crystals which filling vugs and/or fractures show almost pure composition and lesser Nb contents than that formed at magmatic stages. The fluids involved in the potassic episyenitization should have been alkaline and subsaturated in silica to have induced the dequartzification, but with low grade of alkalinity, since highly alkaline fluids would tend to promote sodic metasomatism, with stabilization of albite. Based on obtained data and geologic context of the area, two hypotheses has been proposed to the origin of an alkaline, oxidized and K-rich fluid: (1) separation of a fluid phase from the magmatic liquid associated to FAGHP; and (2) the same fluid which caused the autometassomatic alteration of the albite-rich granite core facies. Whichever it may be the origin, this fluid probably would be modified along the system cooling and promoted sulfidation, hematitization and silicification processes, with the filling of vug and cavities by Fe-, Cu-, Pb-, Zn-sulfides, and hematite and quartz, associated to cassiterite in same places. Whereas the main Sn deposit is associated with magmatic evolution of the Madeira pluton, the cassiterite crystals formed during potassic episyenitization are tin-richer.

Keywords: Petrology – Amazonas (AM). Mineralogy. Hydrothermal processes. Potassic episyenites. Cassiterite. Pitinga Province.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Mapa de localização e acesso à região de Pitinga.....	18
Figura 2 –	Modelos de configuração geológica e tectônica do Cráton Amazônico.....	25
Figura 3 –	Mapa geológico regional.....	27
Figura 4 –	Mapa geológico do Distrito Mineiro de Pitinga, com a distribuição das fácies dos plútons Madeira e Água Boa.....	30
Figura 5 –	Perfil vertical simplificado do furo de sondagem 250S/1200W.....	34
Figura 6 –	Aspectos mineralógicos e texturais do FAGHP.....	38
Figura 7 –	Aspectos mineralógicos e texturais do FAGHP albitizado e greisenizado.....	41
Figura 8 –	Aspectos mineralógicos e texturais do FAGHP epissienitizado.....	43
Figura 9 –	Aspectos mineralógicos e texturais do AGbEp.....	46
Figura 10 –	Aspectos mineralógicos e texturais do AGbEp rico em sulfetos.....	48
Figura 11 –	Aspectos mineralógicos e texturais do GEpsH.....	52
Figura 12 –	Aspectos mineralógicos e texturais do GEpsH hematitizado.....	54
Figura 13 –	Aspectos mineralógicos e texturais do GEpsH silicificado.....	56
Figura 14 –	Aspectos do zircão do FAGHP.....	58
Figura 15 –	Análises composicionais de zircão do feldspato alcalino-granito <i>hipersolvus</i> porfirítico.....	59
Figura 16 –	Aspectos texturais em cristais de quartzo do feldspato alcalino-granito <i>hipersolvus</i> porfirítico (FAGHP). Em ambos, as bordas do fenocristal apresentam texturas de reação com a matriz da rocha...	61
Figura 17 –	Feições texturais mostrando a relação entre duas gerações de cristais de quartzo no FAGHP.....	62
Figura 18 –	Imagens obtidas com ERE, destacando as feições texturais do xenotímio.....	63
Figura 19 –	Feições morfológicas e texturais da bastnasita.....	64
Figura 20 –	Aspectos morfológicos do zircão do albita-granito de borda epissienitizado (AGbEp).....	65
Figura 21 –	Aspectos morfológicos da cassiterita do AGbEp.....	66
Figura 22 –	Aspectos texturais do quartzo hidrotermal formado durante o estágio de silicificação tardia do AGbEp.....	67
Figura 23 –	Aspectos morfológicos do zircão do GEpsH.....	68
Figura 24 –	Aspectos morfológicos e texturais da cassiterita do GEpsH.....	69

Figura 25 –	Tabela indicando os teores máximo e mínimo dos principais óxidos em composição química semiquantitativa, além da média e desvio padrão (DP). Ao lado, espectro representativo das análises pontuais de 1 a 12 da figura 24A.....	70
Figura 26 –	Aspectos texturais dos cristais de quartzo caracterizados no AGbEp.....	71
Figura 27 –	Fotomicrografias dos sulfetos em suas formas de ocorrência mais comuns.....	74
Figura 28 –	Minerais indicadores de greisenização.....	75
Figura 29 –	Aspectos texturais envolvendo silicificação tardia.....	76
Figura 30 –	Aspectos texturais do processo de hematitização.....	78
Figura 31 –	Distribuição das análises químicas (EDS) de cassiterita no diagrama Sn x Nb. O <i>trend</i> de variação composicional demonstra que os cristais do AGbEp são relativamente mais puros, enquanto que a cassiterita do ABGN apresenta os maiores teores de Nb. Os cristais do GEpsH mostram a maior variação composicional, indicando que este litotipo contém cassiterita tanto de origem magmática quanto hidrotermal.....	87
Figura 32 –	Distribuição das análises químicas (por EDS) de zircão no diagrama Zr/Hf <i>versus</i> Hf. Os zircões do AGbEp, representando as rochas epissienitizadas, são relativamente mais enriquecidos em Hf do que os zircões do FAGHP.....	89
Figura 33 –	<i>Trends</i> de variação composicional de zircões do topázio-albita-granito, considerada a fácies mais evoluída do plúton Água Boa.....	90
Figura 34 –	Difratogramas comparados de amostras contendo fenocristais de feldspato alcalino (A) e feldspatos da matriz (B) representativos de rochas epissienitizadas. O feldspato identificado é o microclínio, e as demais fases identificadas em B são quartzo, hematita e fluorita.....	92
Figura 35 –	Mapa esquemático de localização dos furos de sondagem discutidos no estudo comparativo.....	93
Figura 36 –	Perfil esquemático do furo F12-GB.....	95
Figura 37 –	Perfil esquemático do furo F18-GB.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ab	-	Albita
ABG	-	Albita-granito
ABGB	-	Albita-granito de borda
ABGN	-	Albita-granito de núcleo
AGbEp	-	Albita-granito de borda epissienitizado
Bast	-	Bastnasita
Chl	-	Clorita
CL	-	Catodoluminescência
Cst	-	Cassiterita
DCM	-	Depósito Criolítico Maciço
EDS	-	Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (<i>Energy Dispersive Spectrometry</i>)
ERE	-	Elétrons retroespalhados
FAGHP	-	Feldspato alcalino-granito <i>hipersolvus</i> porfirítico
Fl	-	Fluorita
GEpsH	-	Granito epissienitizado híbrido
Hem	-	Hematita
Kfs	-	Feldspato alcalino
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
NC	-	Nicois cruzados
NP	-	Nicois paralelos
Ph	-	Fengita
Py	-	Pirita
Qz	-	Quartzo
Sp	-	Esfalerita
Thr	-	Torita
Xtm	-	Xenotímio
Zrn	-	Zircão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	APRESENTAÇÃO.....	16
1.2	LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO.....	17
1.3	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA.....	19
1.4	OBJETIVOS.....	20
2	MATERIAIS E MÉTODOS	21
2.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.2	PETROGRAFIA.....	21
2.2.1	Macroscópica	21
2.2.2	Microscópica	21
2.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	22
2.4	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).....	22
2.5	TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	23
2.6	CONFECÇÃO DA MONOGRAFIA.....	23
3	GEOLOGIA REGIONAL	24
4	GEOLOGIA LOCAL	28
5	ANÁLISE PETROGRÁFICA DOS LITOTIPOS	31
5.1	INTRODUÇÃO.....	31
5.2	ANÁLISE MACROSCÓPICA.....	32
5.3	ANÁLISE MICROSCÓPICA.....	35
5.3.1	Feldspato Alcalino Granito <i>Hipersolvus</i> Porfirítico (FAGHP)	36
5.3.1.1	Feldspato alcalino-granito <i>hipersolvus</i> porfirítico albitizado e greisenizado.....	39
5.3.1.2	Feldspato alcalino-granito <i>hipersolvus</i> porfirítico epissienitizado.....	42
5.3.2	Albita-Granito de Borda Epissienitizado (AGbEp)	44
5.3.2.1	Albita-granito de borda epissienitizado rico em sulfetos.....	47
5.3.3	Granito Epissienitizado Híbrido (GEpsH)	49
5.3.3.1	Granito epissienitizado híbrido hematizado.....	53
5.3.3.2	Granito epissienitizado híbrido silicificado.....	55
6	CARACTERIZAÇÃO DE FASES MINERAIS ATRAVÉS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	57

6.1	FELDSPATO ALCALINO-GRANITO <i>HIPERSOLVUS</i> PORFIRÍTICO (FAGHP).....	57
6.1.1	Zircão	57
6.1.2	Quartzo	60
6.1.3	Xenotímio	63
6.1.4	Bastnasita	64
6.2	ALBITA-GRANITO DE BORDA EPISSIENITIZADO (AGbEp).....	65
6.2.1	Zircão	65
6.2.2	Cassiterita	66
6.2.3	Quartzo	67
6.3	GRANITO EPISSIENITIZADO HÍBRIDO (GEpsH).....	68
6.3.1	Zircão	68
6.3.2	Cassiterita	69
6.3.3	Quartzo	70
7	ALTERAÇÃO HIDROTERMAL	72
7.1	EPISSIENITIZAÇÃO POTÁSSICA.....	72
7.2	SULFETAÇÃO.....	73
7.3	GREISENIZAÇÃO.....	75
7.4	SILICIFICAÇÃO TARDIA.....	76
7.5	HEMATITIZAÇÃO.....	77
7.6	ALBITIZAÇÃO.....	79
8	DISCUSSÕES	80
8.1	ALBITA GRANITO DE BORDA EPISSIENITIZADO.....	80
8.2	GRANITO EPISSIENITIZADO HÍBRIDO.....	81
8.3	ESTÁGIOS DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL.....	82
8.3.1	Desquartzificação	83
8.3.2	Alteração potássica	83
8.3.3	Greisenização	84
8.3.4	Silicificação tardia	85
8.4	MINERALIZAÇÃO.....	85
8.5	VARIAÇÕES COMPOSICIONAIS DE ZIRCÃO.....	87
8.6	FELDSPATO ALCALINO.....	90
9	ESTUDOS COMPARATIVOS	93
9.1	INTRODUÇÃO.....	93
9.2	CORRELAÇÃO COM O FURO F12-GB.....	94

9.3	CORRELAÇÃO COM O FURO F18-GB.....	97
10	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
	REFERÊNCIAS	105
	ANEXOS	111
	ANEXO A – Log de Sondagem do furo 250S/1200W.....	112
	ANEXO B – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de zircão do FAGHP.....	117
	ANEXO C – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de xenotímio do FAGHP.....	118
	ANEXO D – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de bastnasita do FAGHP.....	118
	ANEXO E – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de zircão do AGbEp.....	119
	ANEXO F – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de cassiterita do AGbEp.....	120
	ANEXO G – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de zircão do GEpsH.....	120
	ANEXO H – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de cassiterita do GEpsH.....	121
	ANEXO I – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de cassiterita do ABGN.....	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A Província Pitinga, situada na porção nordeste do Estado do Amazonas (figura 1), é a maior produtora de estanho do Brasil. A descoberta dos primeiros indícios de cassiterita na região do rio Pitinga coube a Veiga Júnior et al. (1979), sendo a área posteriormente denominada de Província Estanífera Mapuera.

Seus ricos depósitos aluvionares, hoje exauridos, foram intensamente explorados durante as décadas de 1980 e 1990 pela Mineração Taboca S.A. Em 1983, geólogos da empresa descobriram o depósito Madeira, associado com o albita-granito do plúton Madeira. Trata-se de um depósito classe mundial, com 164 milhões de toneladas de minério disseminado com um teor de 0,17% de Sn (cassiterita). Nióbio e tântalo são explorados como subprodutos. Além disso, F (criolita), Y e ETR (xenotímio e gagarinita-(Y)), Zr e U (zircão), Th (torita) e Li (polilitionita) são também considerados como subprodutos em potencial do minério disseminado (BASTOS NETO et al., 2009). Na porção central do albita-granito, há um depósito de criolita maciça com uma reserva de 10 milhões de toneladas a um teor de 31,9% de Na_3AlF_6 . A espessa cobertura saprolítica do albita-granito (minério intemperizado) começou a ser lavrada em 1989. A produção acumulada da mina, entre 1982 e 2008, foi de 283.150 toneladas de Sn. Neste período, também foram produzidos concentrados e ligas de Nb e Ta.

O presente trabalho pretende contribuir para o conhecimento acerca dos processos geológicos que atuaram na borda oeste do albita-granito do plúton Madeira e que deram origem a epissienitos potássicos mineralizados em cassiterita e, subordinadamente, em sulfetos de Cu, Pb e Zn. Além disso, este estudo deverá fornecer importantes subsídios para a investigação dos episódios de mineralização envolvidos na formação dos depósitos estaníferos da Suíte Madeira. Nesta perspectiva, foi realizada a caracterização petrográfica e mineralógica das rochas graníticas e seus derivados hidrotermalizados, bem como dos processos hidrotermais atuantes nesta área, através da análise do furo de sondagem 250S/1200W, executado pela Mineração Taboca na borda oeste do plúton. Este furo

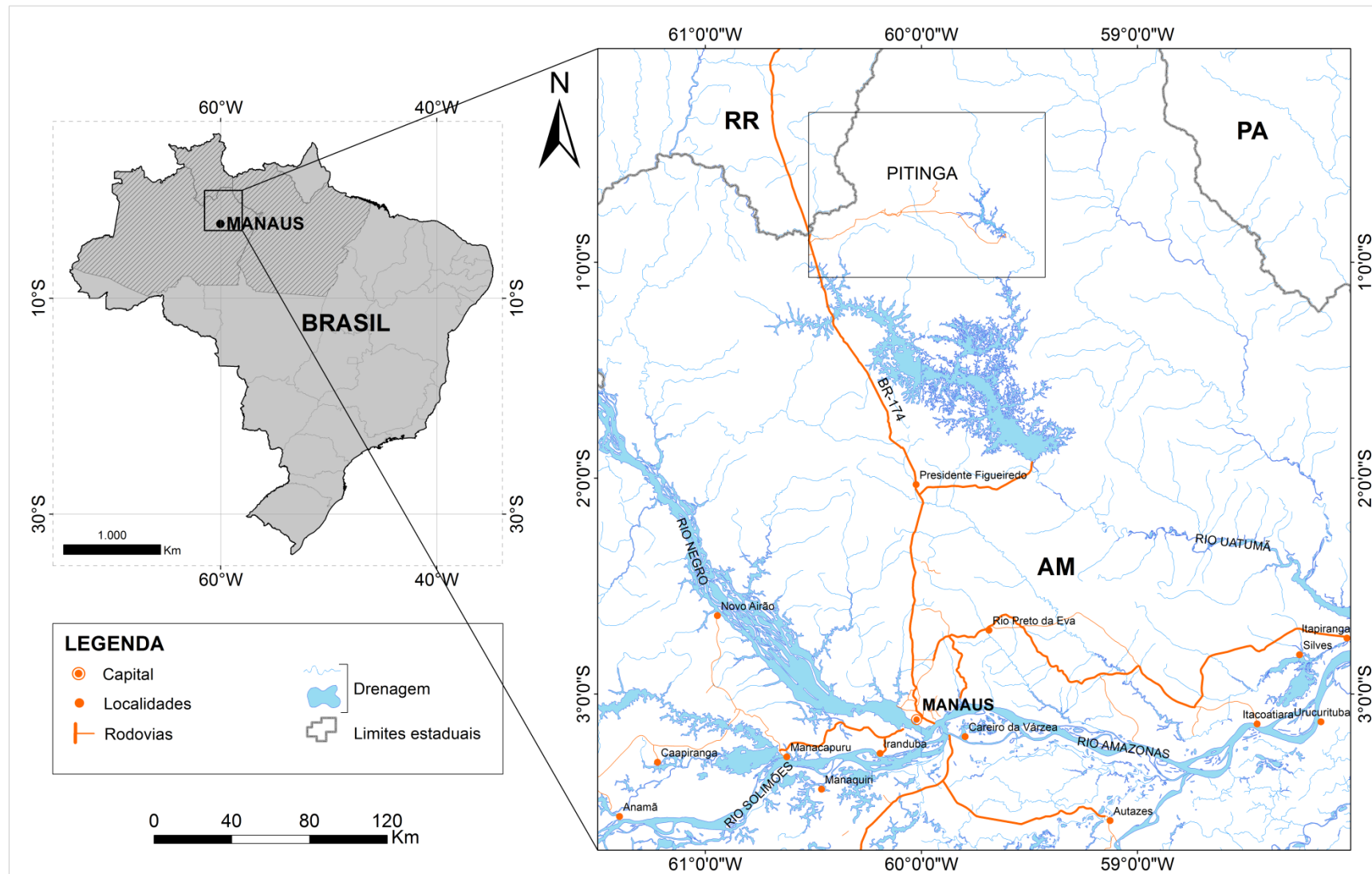
interceptou uma zona de contato e interação entre o albita-granito e o feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico, consideradas as duas fácies petrográficas mais tardias na evolução do plúton Madeira (COSTI, 2000). Este trabalho se insere em uma das sublinhas de pesquisa desenvolvidas pelo Grupo de Pesquisa e Petrologia de Granitoides (GPPG), denominada “Estudo dos processos hidrotermais e mineralizações associadas a rochas graníticas do Cráton Amazônico”.

1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO

A Província Estanífera Pitinga localiza-se na porção norte do Estado do Amazonas, próximo ao Estado de Roraima. Dista cerca de 325 km da cidade de Manaus e situa-se no município de Presidente Figueiredo. A delimitação da mina, em coordenadas geográficas, abrange a área entre 0° 30' S e 0° 51' S (latitude) e entre 60° 15' W e 59° 47' W (longitude), ilustrada na figura 1.

O acesso à região é feito a partir de Manaus, pela rodovia BR-174 (Manaus – Boa Vista), até o Km 259, a partir do qual se segue para leste cerca de 42 km até o início da área de domínio da Mineração Taboca S.A., recentemente adquirida pela mineradora peruana Minsur, proprietária da mina de San Rafael (Peru), outra grande produtora mundial de Sn.

Figura 1 – Mapa de localização e acesso à região de Pitinga.



Fonte: Modificado de CPRM (2004a, b).

1.3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

O plúton Madeira, durante o curso de sua história de cristalização e colocação na crosta, foi formado por diferentes pulsos magmáticos, gerando fácies petrográfica e geoquimicamente distintas (HORBE et al., 1991; COSTI, 2000). O furo de sondagem estudado no presente trabalho (250S/1200W) localiza-se na porção oeste do plúton, e foi executado na região de contato entre a fácies de borda do albita-granito (ABGB) e a fácies feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico (FAGHP).

As relações de contato, observadas em afloramentos, indicam que estes granitos foram derivados de líquidos que coexistiram durante pelo menos parte de sua história de cristalização (COSTI, op.cit.). As relações texturais observadas em amostras de rochas interceptadas pelo furo sugerem processos de interação e mistura dos magmas (*mingling?*) formadores do ABG e do FAGHP e, certamente, a caracterização das relações de contato entre as duas fácies poderá dar maior suporte à hipótese de coexistência dos líquidos.

O estudo desta área permite considerar a possibilidade de que o processo de epissienitização potássica tenha decorrido da própria interação entre os dois magmas e, além disso, pode ter sido o agente principal do metassomatismo que afetou o albita-granito, gerando a subfácies ABGB.

Outra discussão relevante refere-se à origem dos depósitos estaníferos nesta porção do plúton. Neste furo, tanto amostras do albita-granito de borda (modificado) quanto aquelas de rochas epissieníticas apresentam cassiterita disseminada, com algumas diferenças texturais, o que sugere que a mineralização ocorreu tanto no estágio magmático quanto hidrotermal.

A hipótese de que a cassiterita magmática presente na fácies albita-granito tenha se comportado como resistato durante a atuação dos processos de epissienitização, ou que possa ter sido modificada pelos fluidos hidrotermais, é aceitável, tendo em vista a variação observada nas suas características texturais. Estudos preliminares (COSTI, op.cit.) têm demonstrado que o FAGHP não é mineralizado em Sn e, assim, qualquer evidência de cassiterita em amostras de rocha desta fácies, no furo estudado, deveria necessariamente estar associada ao estágio hidrotermal.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho teve como principal objetivo a caracterização petrográfica e mineralógica das rochas graníticas e seus derivados hidrotermalizados, em uma zona de interação entre o albita-granito e o feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico, através do estudo do furo 250S/1200W, realizado na borda oeste do plúton Madeira.

Dentre os objetivos específicos do trabalho podem-se listar os seguintes:

- 1) Caracterização macroscópica das litologias presentes no furo;
- 2) Análise das paragêneses minerais que caracterizam tanto o granito encaixante quanto as rochas hidrotermalizadas, além da caracterização morfológica das diferentes gerações de quartzo formadas durante os estágios magmático e hidrotermal, bem como de cristais de zircão das diferentes litologias;
- 3) Caracterização mineralógica e textural complementar das principais fases minerais presentes no feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico, bem como nas rochas epissienitizadas e veios tardios associados, utilizando-se microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análises semiquantitativas por EDS. Ainda, caracterização morfológica e textural de quartzo, cassiterita e zircão, por catodoluminescência (MEV-CL);
- 4) Caracterização dos processos responsáveis pela formação das rochas hidrotermalizadas e da mineralização estanífera associada, comparando os epissienitos potássicos do furo 250S/1200W com aqueles detectados nos furos F12-GB (não mineralizado) e F18-GB (mineralizado), os dois últimos realizados no plúton Água Boa;
- 5) Realização de estudos comparativos com dados disponíveis na literatura internacional, com ênfase em depósitos estaníferos hidrotermais associados a epissienitos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica consistiu na leitura e análise de publicações, dentre as quais aquelas referentes à geologia da região de Pitinga em seus aspectos petrológicos, geoquímicos e geocronológicos, processos de epissienitização e metassomatismo potássico, granitoides estaníferos e alteração hidrotermal. Este levantamento foi realizado durante todo o período de trabalho.

2.2 PETROGRAFIA

2.2.1 Macroscópica

O estudo petrográfico macroscópico foi feito por meio de análises descritivas de testemunhos de sondagem do furo 250S/1200W, visando a caracterização das principais feições estruturais e texturais, bem como a composição mineralógica das rochas hidrotermais e de suas encaixantes. Estas informações foram utilizadas para a confecção de um perfil vertical do furo (*log* de sondagem), que possibilitou a visualização e um melhor entendimento da distribuição espacial e as relações existentes entre as unidades de rochas descritas. Este trabalho deu suporte à seleção de amostras para a confecção de lâminas polidas para os estudos microscópicos.

2.2.2 Microscópica

Nesta etapa foram descritas 27 lâminas polidas, em microscópio Zeiss, modelo Axioplan2, com recursos de luz transmitida e refletida, do Laboratório de Metalogênese da UFPA. A principal finalidade deste estudo foi a caracterização das assembleias mineralógicas, dos tipos de alteração e de minério, bem como a identificação de suas rochas hospedeiras, levando-se em consideração as condições de alteração a que foram submetidas essas rochas.

2.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As observações por MEV objetivaram o refinamento petrográfico, com a melhor caracterização de fases, no que concerne a eventuais zonações, intercrescimentos e microinclusões, feições estas de difícil visualização ao microscópio petrográfico. O microscópio utilizado foi o modelo LEO-1430 do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV) da UFPA.

Foram realizadas imagens de elétrons retroespalhados, além de análises químicas semiquantitativas através da técnica de espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) de minerais de minério (cassiterita e sulfetos) e minerais de ganga, como o quartzo. Além disso, também foram realizados estudos de caracterização da textura interna e padrões de zoneamentos em cristais de quartzo, cassiterita e zircão, através do sistema de catodoluminescência (Mono CL) acoplado ao MEV.

As amostras analisadas foram preparadas no LABMEV da UFPA e metalizadas com carbono ou platina.

2.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Este método foi utilizado para refinar a identificação das diferentes gerações de feldspato potássico presentes nas rochas graníticas epissienitizadas. As análises foram realizadas por meio de um difratômetro PANalytical, modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), com um goniômetro PW 3050/60 (theta-theta) equipado com um anodo de cobre ($\lambda_{Cu K\alpha} = 1.5406 \text{ \AA}$) e condições de tensão e corrente funcionando a 40 kV e 35mA, respectivamente, e detector do tipo RTMS, X'Celerator.

A interpretação dos dados foi realizada através do software X'Pert Data Collector, tratamento de dados com X'Pert HighScore e busca no banco de dados do PCPDFWIN (*Powder Diffraction File – International Centre for Diffraction Data*). Os equipamentos pertencem ao laboratório de Raios-X do Instituto de Geociências da UFPA.

2.5 TRATAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Os dados de campo e petrográficos foram utilizados para definir os tipos de alteração hidrotermal e estilo de mineralização presentes nos litotipos descritos no furo 250S/1200W. Esses dados, comparados com os de outros autores (COSTI; DALL'AGNOL; MOURA, 2000; BORGES et al., 2002; FERREIRA, 2011) permitiram caracterizar preliminarmente os processos que levaram à formação e evolução do depósito estanífero nesta porção do plúton Madeira.

2.6 CONFECÇÃO DA MONOGRAFIA

Esta etapa deu-se com a elaboração do texto final da monografia nos últimos quatro meses de desenvolvimento do trabalho.

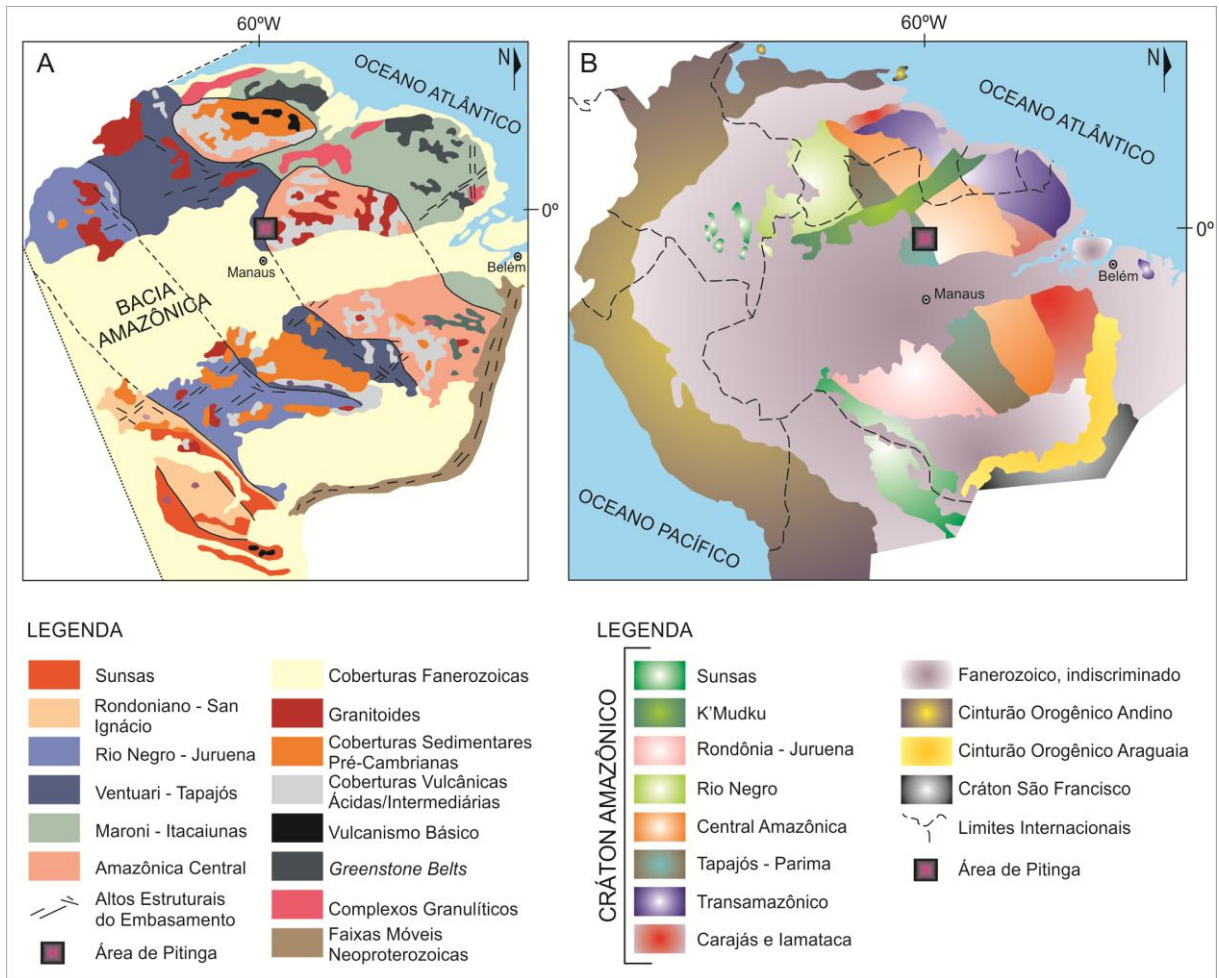
3 GEOLOGIA REGIONAL

O conhecimento geológico regional existente da região de Pitinga foi obtido essencialmente nas décadas de 1970 e 1980, a partir de programas de mapeamento geológico do RADAMBRASIL e da CPRM, além das pesquisas feitas pelo Grupo Paranapanema S/A durante o período de exploração da mina Pitinga. Segundo Bastos Neto et al. (2005), os primeiros registros de mapeamento geológico de detalhe – 1:100.000 – feitos na região devem-se a Araújo Neto e Moreira (1976) e Veiga Júnior et al. (1979).

A Província Pitinga insere-se no contexto geológico e tectônico do Cráton Amazônico, mais precisamente na região sul do Escudo das Guianas (ALMEIDA et al., 1981; GIBBS e BARRON, 1983). Situa-se no Domínio Uatumã-Anauá (REIS et al., 2006), a leste da Província Tapajós-Parima (SANTOS et al., 2000) e a oeste da Província Amazônica Central (TASSINARI e MACAMBIRA, 1999), estando no limite entre elas (figura 2). Alguns autores admitem que a região tenha se formado durante o Arqueano (HASUI et al., 1984; TEIXEIRA et al., 1989), mas os dados geocronológicos e isotópicos disponíveis ainda não são suficientes para a confirmação da ocorrência de uma extensa formação de crosta neste período. A geocronologia aponta uma evolução geológica que vai do Paleoproterozoico ao Mesoproterozoico.

As porções norte e sul da Província Pitinga são constituídas de granitoides cálcio-alcalinos metaluminosos relacionados a processos de subducção, agrupados na Suíte Água Branca (ARAÚJO NETO e MOREIRA, op.cit). Estes granitoides são as rochas mais antigas da região, fornecendo idades entre 1,89 e 1,90 Ga (ALMEIDA, 2006; VALÉRIO, 2006) e estão em contato com rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé (Formações Divisor, Paraíso e Ouro Preto) com idade de 1,88 Ga (COSTI; DALL'AGNOL; MOURA, 2000; FERRON, 2006).

Figura 2 – Modelos de configuração geológica e tectônica do Cráton Amazônico.



Fonte: A) Tassinari et al. (1999); B) Santos et al. (2000). Modificado de Ferron (2006).

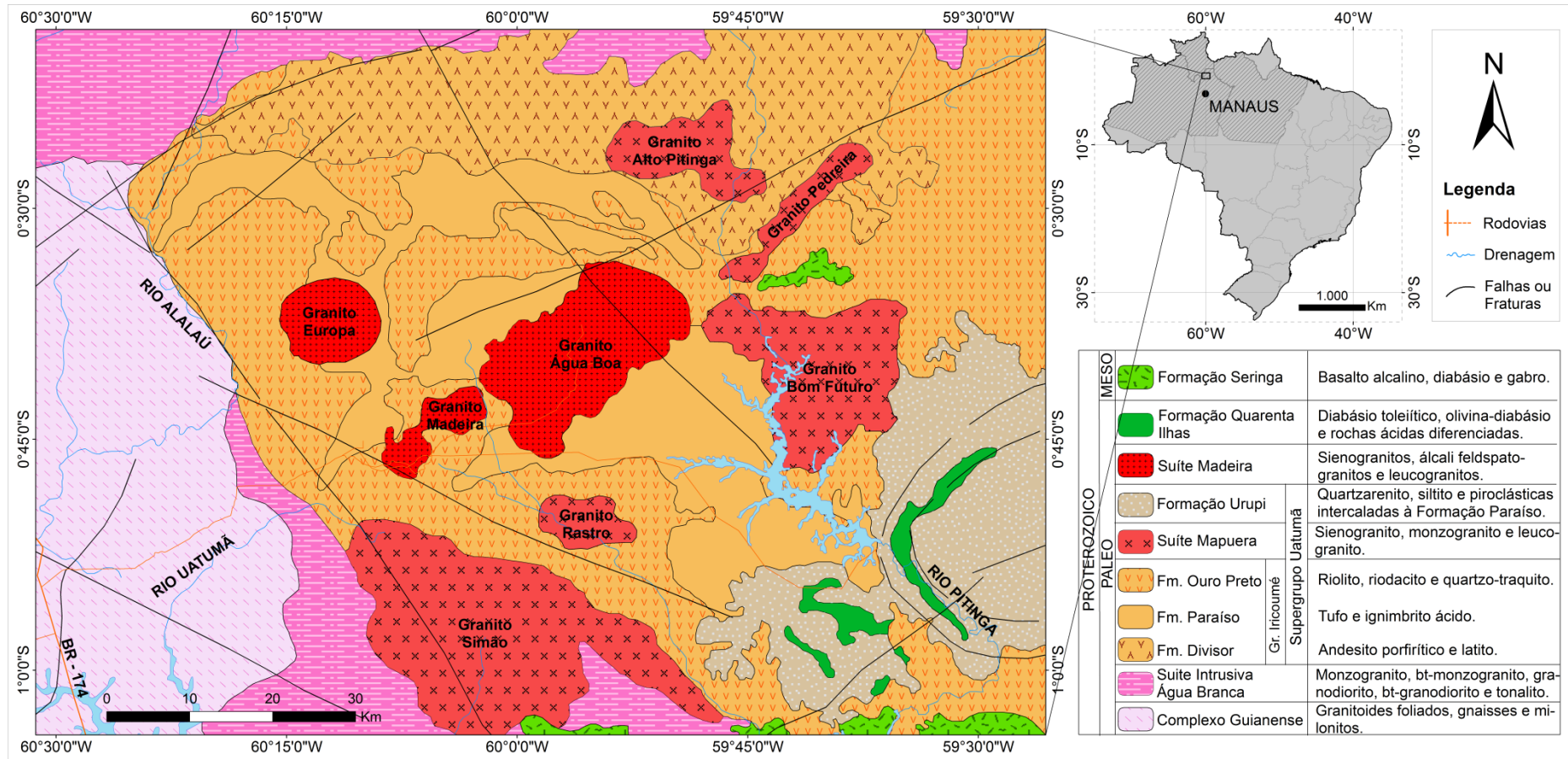
As rochas dessa associação vulcânica possuem diversos corpos graníticos relacionados (granitos Simão, Rastro, Bom Futuro e Alto Pitinga), que fornecem idades Pb-Pb em zircão similares às das rochas do Grupo Iricoumé e foram interpretados como equivalentes plutônicos dessas rochas e agrupados sob a denominação de Suíte Mapuera, pertencentes ao Supergrupo Uatumã (FERRON, 2006; FERRON et al., 2006). Este grupo de rochas é sobreposto por rochas sedimentares clásticas e rochas piroclásticas da Formação Urupi.

Dados isotópicos em rochas dos plútons Madeira, Água Boa e Europa mostraram que esses são significativamente mais jovens do que as suas encaixantes vulcânicas, com idades em torno de 1,83 - 1,82 Ga (LENHARO, 1998; COSTI; DALL'AGNOL; MOURA, 2000). *Sills* toleíticos hipabissais (1780 ± 3 Ma; SANTOS et al., 2002) e diques da Formação Quarenta Ilhas, representam eventos magmáticos tardios. Os diabásios e basaltos da Formação Seringa (~1100 Ma;

VEIGA JÚNIOR et al., 1979) são as rochas magmáticas mais novas registradas na região.

O mapa geológico da figura 3 apresenta a distribuição espacial dos principais litotipos que ocorrem nas circunvizinhanças da Suíte Madeira, além das principais estruturas regionais.

Figura 3 – Mapa geológico regional.



Fonte: Modificado de Ferron (2006) in Bastos Neto et al. (2009).

4 GEOLOGIA LOCAL

Na área da mina Pitinga os depósitos polimetálicos estão hospedados nos plútons Madeira (COSTI, 2000; MINUZZI, 2005) e Água Boa (LENHARO, 1998), que possuem características geoquímicas e mineralógicas de granitos tipo-A altamente fracionados. As mineralizações a cassiterita, criolita, pirocloro, columbita e zircão estão associadas à fácies albita-granito do plúton Madeira (COSTI; BORGES; DALL'AGNOL, 2005; BASTOS NETO et al., 2005, 2009; COSTI et al., 2009) enquanto que os depósitos estaníferos hidrotermais estão hospedados em greisens (BORGES, 2002; BORGES; DALL'AGNOL; COSTI, 2003; FEIO; DALL'AGNOL; BORGES, 2007; BORGES et al., 2009; FEIO et al., 2011) e epissienitos sódicos (COSTI et al., 2002) associados ao plúton Água Boa.

Os plútons Água Boa e Madeira, pertencentes à Suíte Madeira (COSTI; DALL'AGNOL; MOURA, 2000) têm forma alongada e estão orientados paralelamente à estrutura regional NE-SW (figura 4).

O plúton Madeira compreende uma área irregular de 60 km² e possui forma elíptica, alongada segundo a direção NE-SW (LENHARO; POLLARD; BORN, 2003). É separado do plúton Água Boa por um corredor de rochas vulcânicas de 1 km de largura e foi dividido por Costi (2000) em quatro fácies: 1) a fácies anfibólio-biotita-sienogranito, a mais precoce, é metaluminosa, equigranular a porfirítica, constituída por feldspato alcalino perítico, quartzo, plagioclásio, biotita e hornblenda, e os acessórios zircão, fluorita e opacos; 2) a fácies biotita-feldspato alcalino-granito é metaluminosa a peraluminosa, equigranular, localmente porfirítica, composta por feldspato alcalino perítico e quartzo, com plagioclásio em proporções reduzidas a nulas, a única fase varietal é a biotita e os minerais acessórios são fluorita, zircão, opacos e topázio; 3) a fácies feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico é composta por feldspato potássico, por vezes perítico, quartzo e albita tardia, sendo a biotita o mineral varietal e os acessórios fluorita, zircão e opacos; 4) a fácies tardia, o albita-granito, foi subdividida por Horbe et al. (1985) e Teixeira et al. (1992) nas subfácies albita-granito de núcleo (ABGN) e albita-granito de borda (ABGB).

Horbe et al. (1991) compararam o albita-granito do plúton Madeira aos “apogranitos” e sugeriram um modelo metassomático para a sua formação, bem como para o depósito polimetálico (Sn, Nb, Ta, criolita) associado, enquanto que

Lenharo (1998) e Costi (2000) assumiram uma origem magmática para o albita-granito.

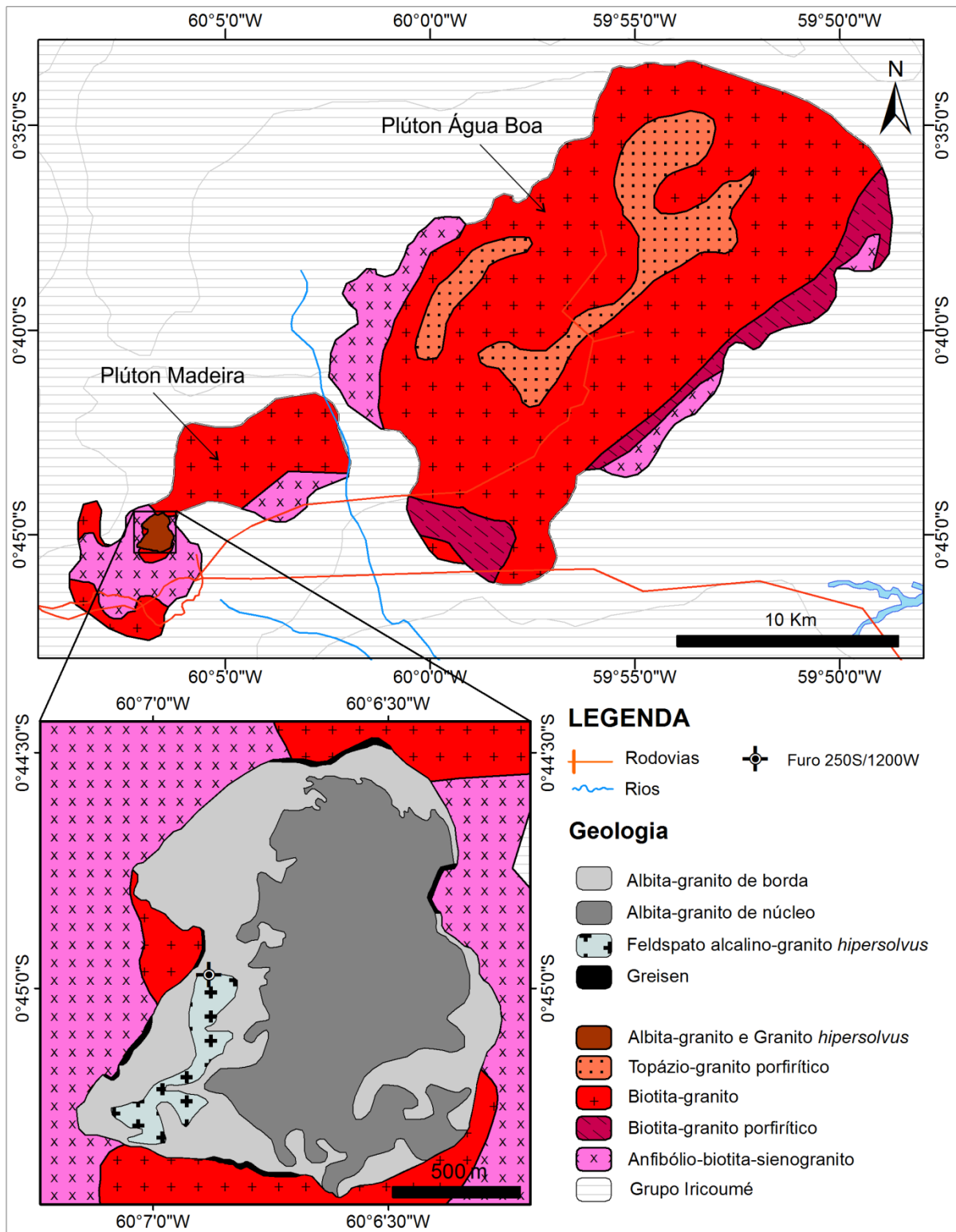
O minério de Sn ocorre no ABGN e no ABGB. Ainda no ABGN, ocorre um depósito criolítico maciço (DCM), minério disseminado de criolita e minério disseminado de Nb/Ta (pirocloro). No ABGB, a mineralização de F é representada por fluorita e o minério de Nb/Ta é a columbita (COSTI, op.cit).

Os contatos entre as fácies do albita-granito são inclinados, com mergulho para as bordas do corpo, indicando que todas as fácies apresentam forma côncava na porção central. Assim, a projeção dos contatos em direção ao topo permite deduzir que aproximadamente 180 metros da seção superior do albita-granito foram removidos por erosão. Com isto, estima-se que um volume aproximado de 1,5 km³ de material enriquecido em Sn, Nb e Zr foi transportado e acumulado nos aluviões adjacentes à Serra do Madeira, sugerindo que provavelmente o albita-granito foi a fonte das mineralizações secundárias relacionadas ao plúton Madeira (COSTI, op.cit).

Ao longo da borda oeste o contato entre o ABGB e o FAGHP é igualmente marcado, porém de modo bem mais localizado, pelo desenvolvimento de uma zona ou faixa greisenizada no topo do ABGB. Esta faixa, onde identificada, tem espessura média de 50 cm, mergulhando entre 25° e 30° para WNW, e nela o ABGB é silicificado e fortemente oxidado, apresentando bolsões ou vesículas preenchidas por quartzo, feldspato alcalino, pirita, fluorita, hematita e ametista. Na direção sul a faixa greisenizada torna-se mais espessa, tendo sido identificada em testemunhos de sondagem obtidos no perfil saprolítico.

O mapa geológico da figura 4 apresenta a distribuição das fácies dos dois plútons graníticos mineralizados da Suíte Madeira e o detalhamento das subfácies do plúton Madeira.

Figura 4 – Mapa geológico do Distrito Mineiro de Pitinga, com a distribuição das fácies dos plútons Madeira e Água Boa, e em detalhe as subfácies do albita-granito e feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico.



Fonte: Modificado de Costi (2000).

5 ANÁLISE PETROGRÁFICA DOS LITOTIPOS

5.1 INTRODUÇÃO

A análise petrográfica foi realizada em amostras e seções polidas de testemunhos do furo 250S/1200W, na zona de contato entre as fácies albita-granito de borda (ABGB) e feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico (FAGHP), situado na porção sudoeste do plúton Madeira.

O furo objeto de estudo é vertical e foi executado até a profundidade de 99,54 metros. A amostragem foi realizada no campo, com base em variações litológicas e de cor, onde a interface saprólito-rocha sã é registrada a aproximadamente 23 metros de profundidade.

A descrição macroscópica possibilitou a confecção de um perfil vertical (*log* de sondagem) esquemático (figura 5), a fim de facilitar a visualização da distribuição vertical dos diferentes litotipos e suas relações de contato. Será também de grande utilidade – em conjunto com outros furos realizados próximos à área deste – na tentativa de correlação espacial lateral dos litotipos.

As análises petrográficas em escalas macro e microscópica permitiram a caracterização de três grupos litológicos, por meio de aspectos texturais e mineralógicos, assim como processos de alteração hidrotermal. Foram distinguidos: 1) feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico (FAGHP); 2) albita-granito de borda epissienitizado (AGbEp) e; 3) granito epissienitizado híbrido (GEpsH). A seguir serão descritas as características petrográficas destes litotipos, obtidas no presente estudo.

5.2 ANÁLISE MACROSCÓPICA

O furo de sondagem foi executado em uma região de contato entre duas subfácies do granito Madeira (albita-granito de borda e feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico) na borda oeste do corpo.

O feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico (FAGHP) é o litotipo que apresenta maior grau de preservação, pois suas características mineralógicas e texturais originais são facilmente reconhecidas. Em profundidades mais rasas (de 20 a 40 metros) tem maior volume e maior extensão vertical, estando levemente cloritizado e oxidado. Também apresenta fraturas milimétricas a centimétricas, oblíquas em relação ao eixo do testemunho ($\approx 35^\circ$), preenchidas por quartzo. Em profundidades maiores, torna-se mais delgado e menos frequente, ocorrendo alternadamente com o granito epissienitizado híbrido, até aproximadamente 45 metros. É heterogêneo, de granulação grossa e cor, de maneira geral, marrom avermelhada, devido aos fenocristais de feldspato potássico de proporções centimétricas e pela oxidação visível no furo como um todo. A matriz quartzo-feldspática tem cor acinzentada. Em níveis bem mais profundos (93,5 metros), o litotipo reaparece fortemente transformado, dada a menor abundância de quartzo e a coloração uniforme da rocha. Trata-se, no dado intervalo, de uma rocha de granulação média, moderadamente fraturada e fortemente impregnada por óxidos de ferro, tendo maiores concentrações de feldspato potássico e hematita. Em decorrência da mudança de sua textura e composição originais, este litotipo foi descrito como FAGHP epissienitizado.

O albita-granito de borda epissienitizado (AGbEp) ocorre em vários intervalos ao longo do furo de sondagem (22,3, 26,5, 28,0, 47,0, 60,5, 73,5, 78,5 e 83,0 metros), geralmente com pouca espessura. Tem granulação fina a média, homogeneidade em escala macroscópica, cor marrom avermelhada e presença de cassiterita. Tanto em intervalos rasos (26,5 e 28,0 metros) quanto profundos (60,5 e 78,5 metros), apresenta-se levemente greisenizado, onde se observam cavidades pequenas preenchidas por quartzo, fengita e clorita, sendo abundante em concentrações de fluorita e sulfetos disseminados.

Os contatos com o FAGHP são na maioria das vezes bem marcados, podendo haver transições gradacionais entre os dois litotipos. Caracteriza-se pela presença

de abundantes cavidades e vênulas finas a médias, preenchidas por quartzo, ocorrendo também cavidades abertas. Ocorrem pirita e pontuações de fluorita e hematita.

O granito epissienitizado híbrido é o litotipo mais abundante no furo de sondagem. Tem geralmente granulação fina, alguns fenocristais euédricos médios, esparsos ou isolados (até 5 mm) de feldspato potássico e grandes quantidades de quartzo e hematita, esta última seguidamente como inclusões em feldspato potássico. Localmente, mostra-se mais homogêneo, desprovido de quartzo e com zonas enriquecidas em sulfetos e fluorita. Este litotipo torna-se mais contínuo (até 15 metros) nas porções mais profundas do furo. À profundidade de 63,0 metros a rocha contém cristais de feldspato potássico de granulação grossa (até 3 cm) e quartzo intersticial, com sulfetos muito finos disseminados.

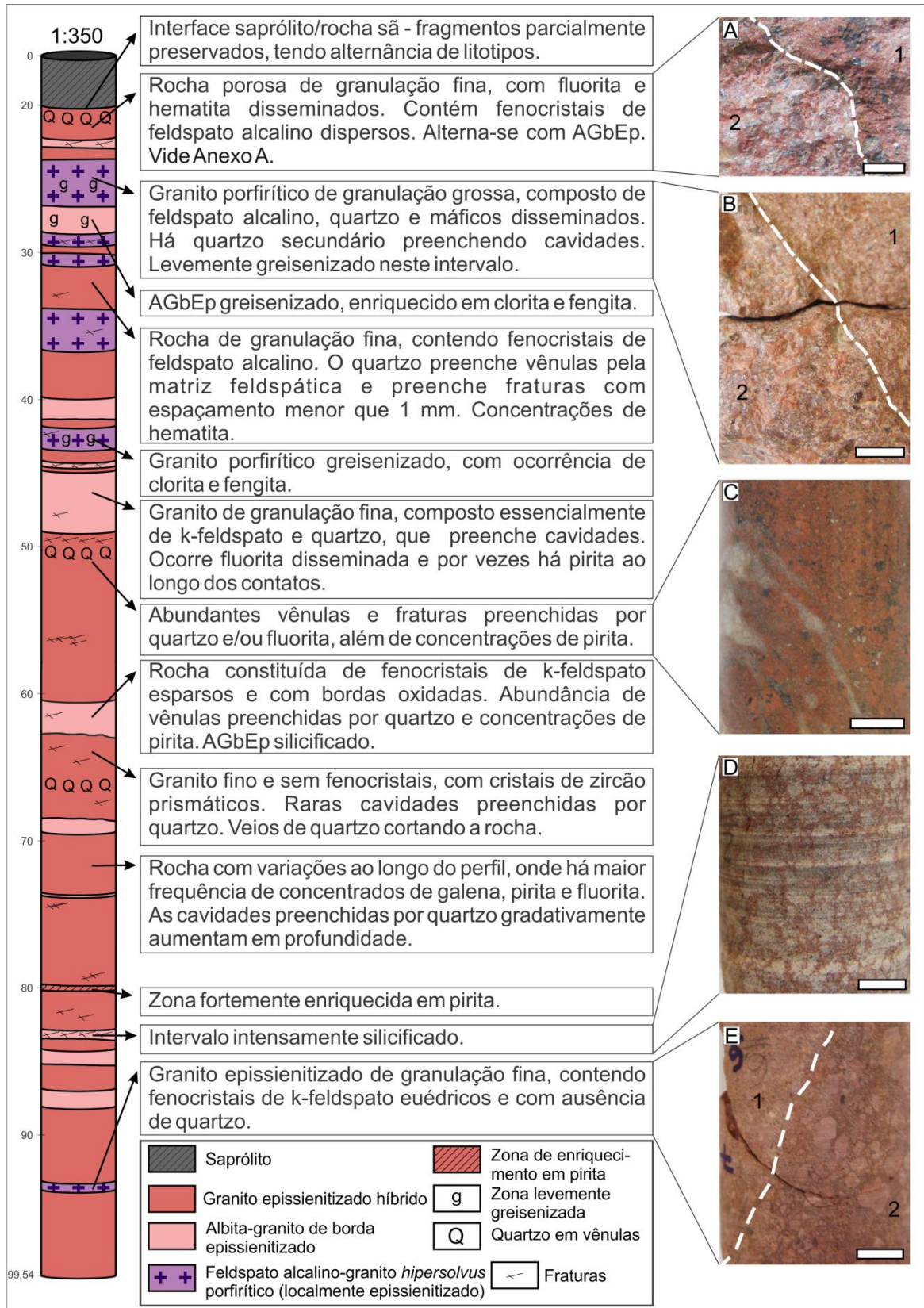
Comumente se observa, nos contatos abruptos entre litotipos, a ocorrência de vênulas e bolsões milimétricos a centimétricos preenchidos por quartzo. Por vezes, se observa cristais de fluorita e raros sulfetos nos contatos dos bolsões com a rocha, ou ao longo dos contatos entre litotipos.

Vale ressaltar, nas relações de contato, a ocorrência de porções de um litotipo no domínio de outro subjacente. À profundidade de 41,8 metros, porções irregulares do GEpsH (sobrejacente) podem ser distinguidas no domínio do FAGHP (subjacente) abruptamente (enclaves?). Na profundidade de 76,5 metros, ocorrem porções fortemente silicificadas (AGbEp) no domínio do GEpsH, empobrecido em quartzo.

O feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico é aqui assumido como a rocha hospedeira dos litotipos alterados hidrotermalmente. No entanto, admite-se serem o FAGHP e o albita-granito os protólitos das rochas alteradas, onde o processo de epissienitização resultou na formação de rochas híbridas e lixiviadas em quartzo.

A figura 5 apresenta simplificada a variação e distribuição dos litotipos no furo de sondagem objeto deste estudo. Alguns intervalos foram exagerados para facilitar a visualização. Um perfil detalhado do furo de sondagem é apresentado no Anexo A.

Figura 5 – Perfil vertical simplificado do furo de sondagem 250S/1200W. Detalhes no anexo A. A) contato entre GEpsH fino [1] e AGbEp [2]; B) passagem abrupta de GEpsH [1] para FAGHP [2]; C) vênulas de quartzo; D) AGbEp com alta proporção de quartzo preenchendo cavidades; E) contato entre GEpsH [1] e FAGHP epissienitizado [2]. A escala nas fotografias equivale a 1 centímetro.



5.3 ANÁLISE MICROSCÓPICA

Foram descritas neste estágio do trabalho 27 (vinte e sete) lâminas polidas, nas quais foram realizados a caracterização e o detalhamento dos aspectos texturais, identificação das fases minerais constituintes e as relações entre elas, além da identificação dos processos de alteração hidrotermal atuantes nas rochas.

O albita-granito de borda (ABGB), caracterizado por Costi (2000), é uma rocha cristalizada em condições *subsolvus*, com quantidades variáveis de quartzo, feldspato potássico e albita. No furo 250S/1200W, o ABGB encontra-se modificado, em função da total ausência de albita, tendo sido esta provavelmente substituída por feldspato secundário, o que aumenta o conteúdo modal total de feldspato potássico da rocha. Além disso, a abundância de quartzo deste litotipo é extremamente variável, desde intervalos em que a rocha apresenta baixos conteúdos modais, até aqueles onde a silicificação tardia causou o enriquecimento desta fase mineral. Estas características possibilitaram classificar o litotipo em questão como albita-granito de borda epissienitizado (AGbEp).

O termo “epissienito”, segundo Recio et al. (1997), não é reconhecido como um tipo de rocha pela IUGS (*International Union of the Geological Science*), tendo, por suas características petrológicas e de campo facilmente reconhecíveis, classificação de maneira análoga a termos como “pegmatito”. Por isso, a classificação aqui utilizada foi realizada com base no tipo de feldspato predominante na rocha. No caso em questão, o feldspato predominante é potássico, caracterizando, então, os epissienitos como potássicos. Além disso, apesar de parte do quartzo magmático ter sido dissolvida durante os estágios iniciais da epissienitização, o enriquecimento em quartzo observado em várias amostras é decorrente do estágio de silicificação tardia do processo de alteração hidrotermal.

A característica mais marcante observada é a de que os processos de interação entre o ABGB e o FAGHP deram origem a rochas com aspectos texturais e mineralógicos híbridos. Em várias amostras pôde ser observada a presença de minerais característicos das duas fácies, preservados, e misturados em diferentes proporções. Além disso, o processo de epissienitização causou nestes litotipos um enriquecimento generalizado em feldspato potássico, que ocorre como cristais de granulação mais fina do que aqueles magmáticos, intensificando, ainda mais, o

caráter heterogêneo resultante dos processos hidrotermais que atuaram nesta porção do plúton Madeira. Mais localmente, também foram descritas associações minerais resultantes de processos de greisenização incipiente.

Abaixo, serão descritos os principais aspectos texturais e mineralógicos dos litotipos caracterizados no estudo petrográfico microscópico.

5.3.1 Feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico (FAGHP)

É composto principalmente por feldspato alcalino e quartzo, tendo proporções acessórias de zircão, fluorita, hematita, pirita e galena, além de ocorrências localizadas e incipientes de cassiterita. Apresenta textura porfirítica, com fenocristais de feldspato alcalino peritítico e quartzo, de granulação grossa, imersos em uma matriz de granulação média a fina composta de feldspato alcalino, quartzo e opacos, essencialmente (figura 6A e B).

No topo do furo, este litotipo apresenta-se mais fraturado, sendo as fraturas preenchidas por quartzo euédrico e policristalino, além de grande concentração de hematita.

O feldspato alcalino tem proporção modal variando de 30 a 70%, ocorrendo geralmente de duas formas. O tipo 1, *Kfs1*, é representado pelos fenocristais euédricos a subédricos, com dimensões entre 0,7 e 9,4 mm. São peritíticos (com intercrescimentos do tipo “colcha de retalhos”), sendo visível em alguns cristais o maclamento tipo Carlsbad. Por vezes apresentam manchas irregulares de diferente orientação ótica. São moderadamente fraturados e, normalmente, essas fraturas estão preenchidas por óxidos de ferro. Nas bordas dos cristais observam-se feições de corrosão, principalmente no contato com o quartzo da matriz. O tipo 2, *Kfs2*, ocorre na forma de cristais anédricos muito finos (0,3-0,7 mm), na matriz da rocha. Corroem e penetram cristais de zircão e fenocristais de quartzo. Comumente têm aspecto turvo e contatos irregulares entre si.

O quartzo ocupa de 25 a 60% da rocha, ocorrendo em pelo menos cinco tipos morfológicos: o *Qz1* ocorre como fenocristais euédricos a subédricos, com dimensões variando entre 0,6 e 5,2 mm, límpidos e moderadamente fraturados e apresentam, por vezes, bordas corroídas (figura 6C e D); o *Qz2* forma agregados policristalinos de cristais anédricos, por vezes em desequilíbrio com *Kfs1* e corroídos pela matriz quartzo-feldspática; o *Qz3*, tipo morfológico mais abundante, ocorre

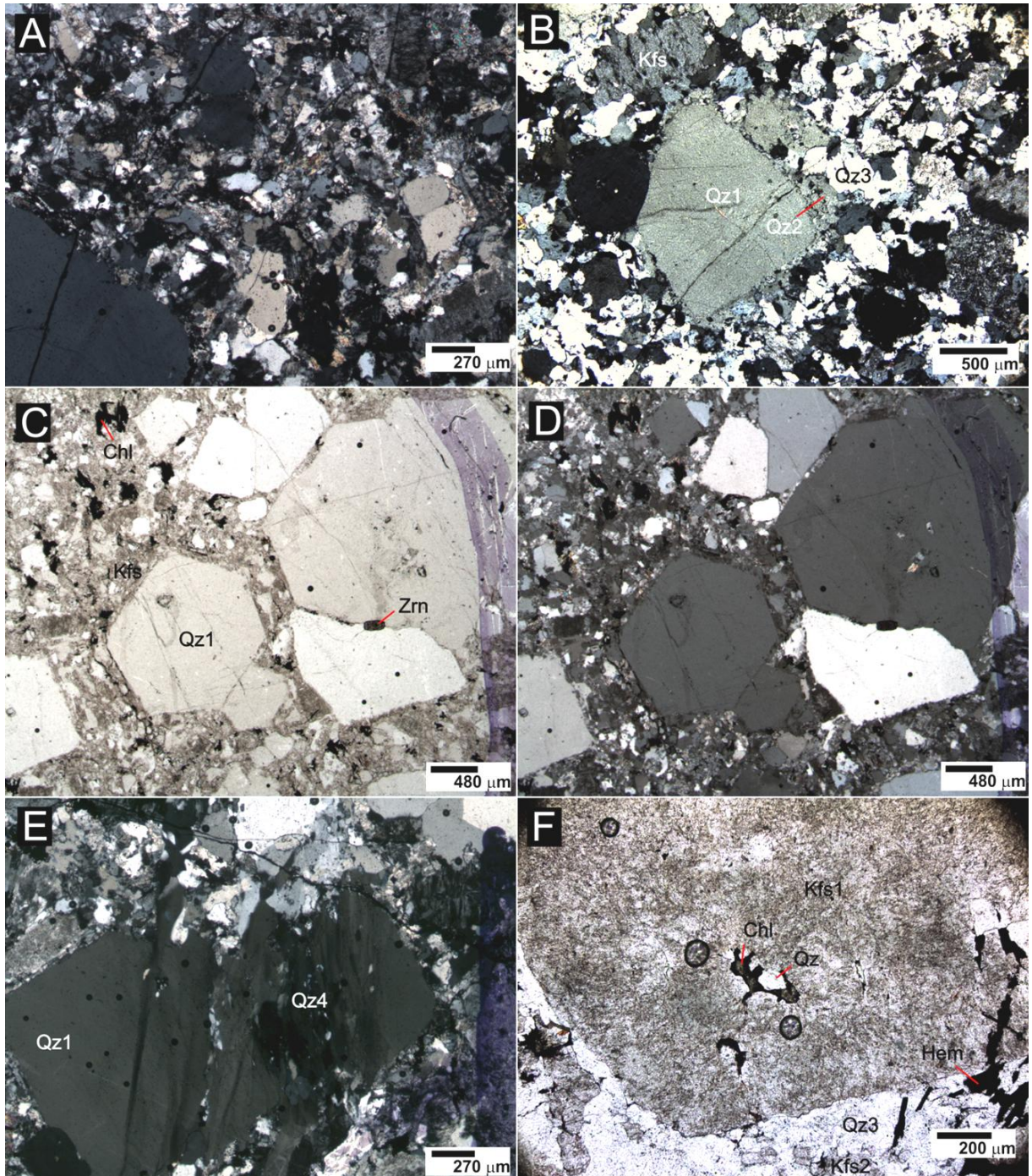
como cristais anédricos finos (0,2-0,6 mm), constituintes da matriz, que corroem e penetram os fenocristais da rocha; o Qz4 é de ocorrência localizada, configurando-se como quartzo de recristalização. Ocorre cortando a rocha, numa zona de cristalização de quartzo tardio. Apresenta orientação ótica diferente e orientada (figura 6E); o Qz5 é muito fino, policristalino, e ocorre preenchendo microfraturas na rocha.

O zircão geralmente ocorre incluso nos fenocristais de quartzo e é euédrico a subédrico.

Os minerais opacos, pirita e hematita, perfazem aproximadamente 2% da proporção modal da rocha. A pirita é extremamente escassa, e ocorre como cristais euédricos a subédricos disseminados na rocha; a hematita ocorre geralmente na forma intersticial, tanto como cristais euédricos (lamelas com dimensões de até 0,3 mm, isoladas ou agrupadas) como anédricos, geralmente junto a microgrânulos de óxidos de Fe. Ocorre também preenchendo cavidades nos cristais de feldspato potássico, configurando-se como fase mineral tardia, de filiação hidrotermal.

Fluorita, fengita e clorita são raras. A fluorita ocorre associada à fengita e nos interstícios dos cristais, sendo geralmente arroxeadada. A fengita é pleocroica, ocorrendo em agregados e associada à hematita e clorita. A clorita geralmente ocorre bordejando os cristais de *Kfs1*, e também como inclusões nestes, associada a quartzo (figura 6F).

Figura 6 – Aspectos mineralógicos e texturais do FAGHP. A) visualização da textura do FAGHP, NC; B) visualização geral da textura da rocha, destacando-se as várias gerações de quartzo, como Qz1 (fenocristal), Qz2 (bordejando Qz1) e Qz3 (matriz), NC; C) fenocristais euédricos de quartzo (Qz), NP; D) idem a C, a nicois cruzados; E) cristais de Qz1 cortados pela geração de Qz4, NC; F) associação de clorita e quartzo preenchendo cavidade em fenocristal de feldspato alcalino.



Fotomicrografias de luz transmitida. Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

5.3.1.1 Feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico albitizado e greisenizado

No intervalo de 24,5 a 25,0 metros de profundidade, o FAGHP apresenta associações minerais típicas de processos de albitização (albita) e de greisenização (mica branca, quartzo, clorita, fengita, fluorita e óxidos de ferro).

A albita ocorre principalmente nas bordas dos fenocristais de feldspato alcalino perítico, como cristais de forma irregular e com texturas de corrosão, quando em contato com o quartzo da matriz. Em alguns fenocristais há substituição do feldspato alcalino albitizado por sericita, clorita e quartzo (figura 7A). Na matriz, a albita ocorre como cristais ripiformes subédricos em agregados com quartzo. Ocorre também nas bordas dos fenocristais de feldspato alcalino, como produto de alteração deste.

A mica branca, do tipo sericita, ocorre como cristais finos, principalmente inclusa nos fenocristais de quartzo. Ocorre menos comumente, como lamelas associadas ao feldspato alcalino, extremamente deformada e preenchendo interstícios. A fengita ocorre em agregados minerais com clorita, dispersos na matriz e próximos aos fenocristais de feldspato alcalino. Já a fluorita é rara e associa-se à fengita.

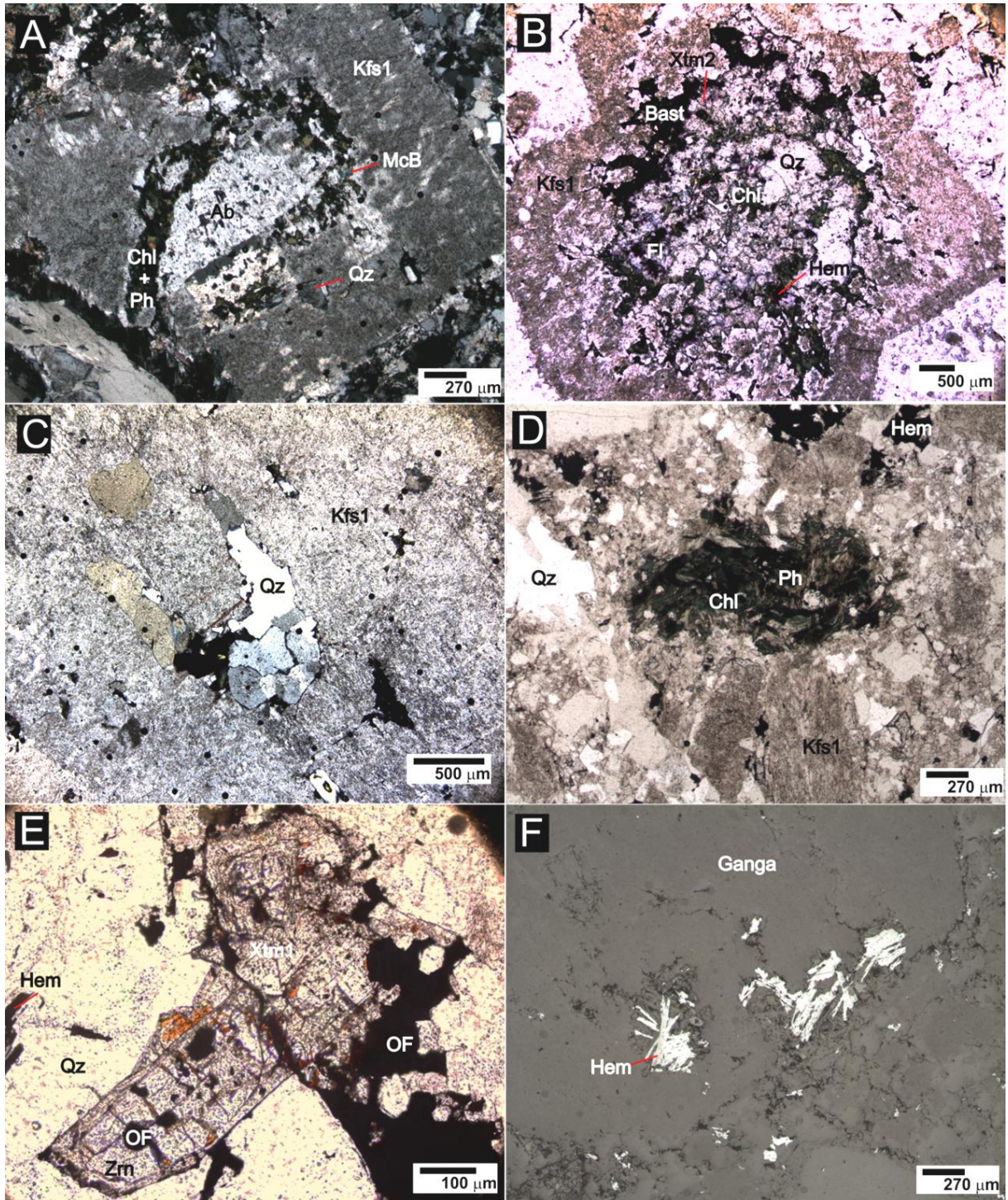
Em outro intervalo, de 42,0 a 43,3 metros, são observadas duas associações minerais, geralmente preenchendo cavidades nos fenocristais de feldspato alcalino (figura 7B). Citam-se: (a) quartzo, clorita e hematita e (b) bastnasita, fluorita, xenotímio, zircão, clorita e hematita. Estas cavidades também são preenchidas por quartzo (figura 7C) e as associações de clorita e fengita preenchem cavidades por toda a rocha (figura 7D).

O xenotímio $[(Yb, Y, ETRP)PO_4]$ ocorre basicamente de duas formas: (a) como cristais euédricos a subédricos ($Xtm1$) com dimensões entre 0,2 e 0,8 mm, bordejando cristais de zircão (figura 7E); (b) em cristais muito finos (menores que 0,1 mm) e euédricos ($Xtm2$), dentro de cavidades nos fenocristais de feldspato alcalino, ora isolados, ora na associação supracitada. Por vezes, os cristais de zircão encontram-se inclusos nos cristais de xenotímio.

A bastnasita $[(Ce,La,Y)(CO_3)F]$ apresenta-se como cristais anédricos (1-3 mm), como preenchimento da porção mais externa de cavidades nos cristais de feldspato alcalino.

A hematita ocorre tanto em agregados, preenchendo cavidades, como isolada, nos interstícios dos cristais e fraturas. A ganga constitui-se de feldspato alcalino, quartzo, zircão e fluorita, essencialmente (figura 7F).

Figura 7 – Aspectos mineralógicos e texturais do FAGHP albitizado e greisenizado. A) associação *Ab + Chl + Ph + Qz + McB* preenchendo cavidade em fenocristal de feldspato alcalino, NC; B) associação *Xtm + Bast + Fl + Chl + Hem + Qz* preenchendo cavidade em fenocristal de feldspato alcalino, NC; C) cristais de quartzo inclusos em fenocristal de *Kfs*, NC; D) associação *Chl + Ph* preenchendo cavidade, NP; E) zircão euédrico com inclusões de óxidos de ferro (OF), circundado por cristais de xenotímio (*Xtm1*), NP; F) disposição da hematita como palhetas agregadas, preenchendo cavidade.



McB = mica branca; Bast = bastnasita. Fotomicrografias de luz transmitida de A a E, e de luz refletida em F. Demais Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

5.3.1.2 Feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico epissienitizado

Na profundidade de aproximadamente 96,0 m, o FAGHP apresenta-se modificado, com uma composição mineralógica à base de 90% de feldspato alcalino, além de quartzo, fluorita, hematita, pirita e galena.

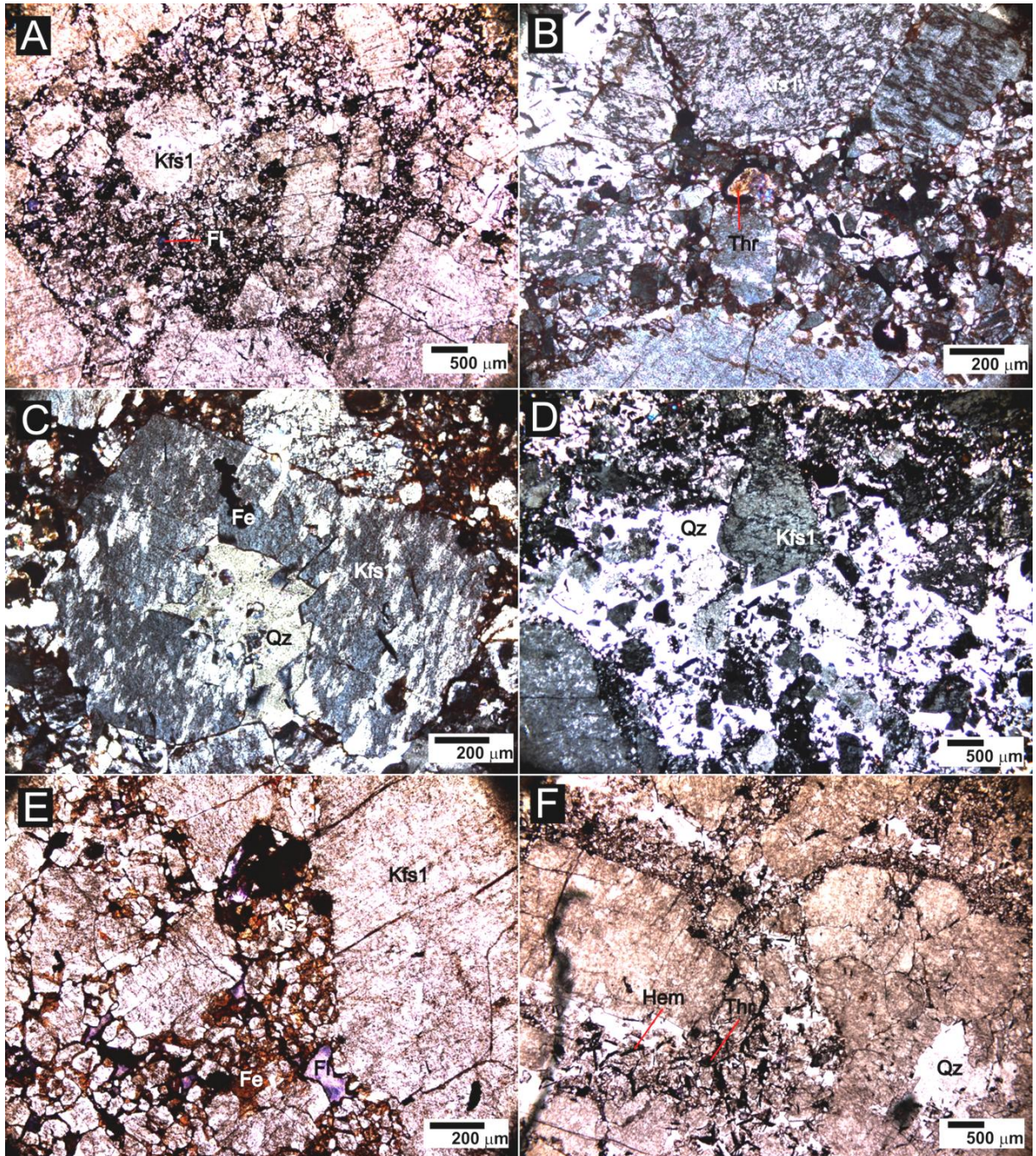
O feldspato potássico ocorre de duas formas: (a) como fenocristais euédricos a subédricos (*Kfs1*), com dimensões que variam de 1,2 a 7,3 mm, perfazendo 45% do total, fraturados, com feições de corrosão preenchidas por quartzo e com manchas irregulares, por vezes mostrando maclamento tipo Carlsbad e; (b) uma geração mais tardia (*Kfs2*) e extremamente fina (< 1,2 mm), constituindo a matriz e compondo 55% do total de feldspatos (figura 8A e B). Apresenta-se fortemente impregnada por óxidos de ferro, conferindo à rocha uma coloração mais avermelhada em relação às outras ocorrências do litotipo.

O quartzo ocorre em proporção modal menor que 3% e é completamente intersticial, com distribuição heterogênea, mais comumente circundando os fenocristais de feldspato potássico (figura 8C) ou englobando as demais fases minerais, evidenciando silicificação tardia (figura 8D).

A fluorita é intersticial, perfaz cerca de 2% da matriz e corrói tanto seus cristais como os fenocristais (figura 8E e F).

Particularmente neste intervalo há abundância de hematita ($\approx 4\%$), na forma de finas lamelas isoladas, por vezes agregadas. Ocorre na matriz, preenchendo interstícios, com subordinada pirita (na forma de cristais euédricos isolados pequenos). A galena é extremamente rara, e está sempre associada à pirita. Ocorrem ainda cristais anédricos muito finos de torita, os quais apresentam densa coroa de pirita e galena.

Figura 8 – Aspectos mineralógicos e texturais do FAGHP epissienitizado. A) textura geral, com fenocristais de feldspato alcalino (*Kfs1*) fortemente fraturados, imersos em matriz fina de *Kfs2*, NP; B) aspecto textural, NC; C) cristal de feldspato alcalino com preenchimento intersticial de quartzo no centro, NC; D) quartzo secundário, produto de silicificação tardia, com substituição parcial dos feldspatos alcalinos, NC; E) aspectos da matriz, fortemente impregnada por óxidos de ferro (Fe) e com fluorita intersticial, NP; F) composição da matriz com quartzo intersticial escasso, além de cristais de hematita e torita, NP.



Fotomicrografias de luz transmitida. Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

5.3.2 Albita-granito de borda epissienitizado (AGbEp)

Este litotipo é composto principalmente de quartzo e feldspato alcalino e, em menor quantidade, cassiterita, zircão, esfalerita, torita, fluorita, sericita, fengita e óxidos de ferro. Apresenta textura predominantemente inequigranular xenomórfica, de granulação média a grossa (figura 9A). Comparativamente ao albita-granito de borda (COSTI, 2000), é totalmente desprovido de albita, fato este decorrente da epissienitização.

O quartzo tem proporções modais de 45% e ocorre basicamente de duas formas: (a) como cristais de granulação média a grossa (Qz1), com tamanhos entre 1,9 e 6,5 mm, secundários, intersticiais, que perfazem a maior percentagem dentre os diferentes tipos. Têm aspecto límpido e englobam os finos cristais de feldspato alcalino, zircão, cassiterita e opacos. Por vezes, os opacos e o feldspato potássico parecem ter sido parcialmente consumidos; (b) Qz2, produto de intercrescimento nos contatos entre Qz1 e feldspato potássico. O quartzo ainda ocorre como cristais anédricos agregados e com contatos irregulares com os feldspatos alcalinos (figura 9B). Mais raramente pode ocorrer como cristais precoces muito finos, ora euédricos, ora anédricos, sobrecrecidos de Qz1.

O feldspato alcalino ocupa de 50% da rocha, é subédrico a anédrico, de granulometria média a fina e tem aspecto turvo. É fortemente impregnado por óxidos de ferro nas bordas. Ocorre como cristais médios subédricos de distribuição localizada, com bordas corroídas por quartzo; como cristais anédricos de tamanhos entre 0,4 e 2,6 mm, e contatos suturados; ou como cristais anédricos muito finos, entrecortados por clorita.

O zircão tem proporção modal de 2%, ocorre como cristais subédricos a anédricos fortemente metamitizados (figura 9C), com dimensões entre 0,4 e 2,4 mm e com inclusões de pirita, torita, columbita, quartzo e fluorita (figura 9D). São impregnados por óxidos de ferro e encontram-se muito corroídos por quartzo e feldspato potássico (figura 9E).

A fluorita é rara, com proporções menores que 1%, apresentando bordas impregnadas de óxidos de ferro. Ocorre como inclusões no zircão e intersticial aos cristais de feldspato potássico. Por vezes preenche fraturas maiores, ou substitui minerais opacos (pseudomorfismo). Comumente associa-se a esfalerita e clorita.

A torita é rara, com alguns cristais anédricos de forma alongada de tamanhos de 2,9 mm, com forte impregnação por óxidos de ferro. Os opacos formam uma fina camada ao longo das bordas do mineral (geralmente hematita). Ocorre por vezes junto ao zircão, numa relação de substituição.

A cassiterita é relativamente rara (1%), com cristais muito finos (dimensões de 0,2 a 0,5 mm) e com bordas corroídas em contato com fluorita e quartzo (figura 9F), sendo por vezes zonada e associada ao zircão.

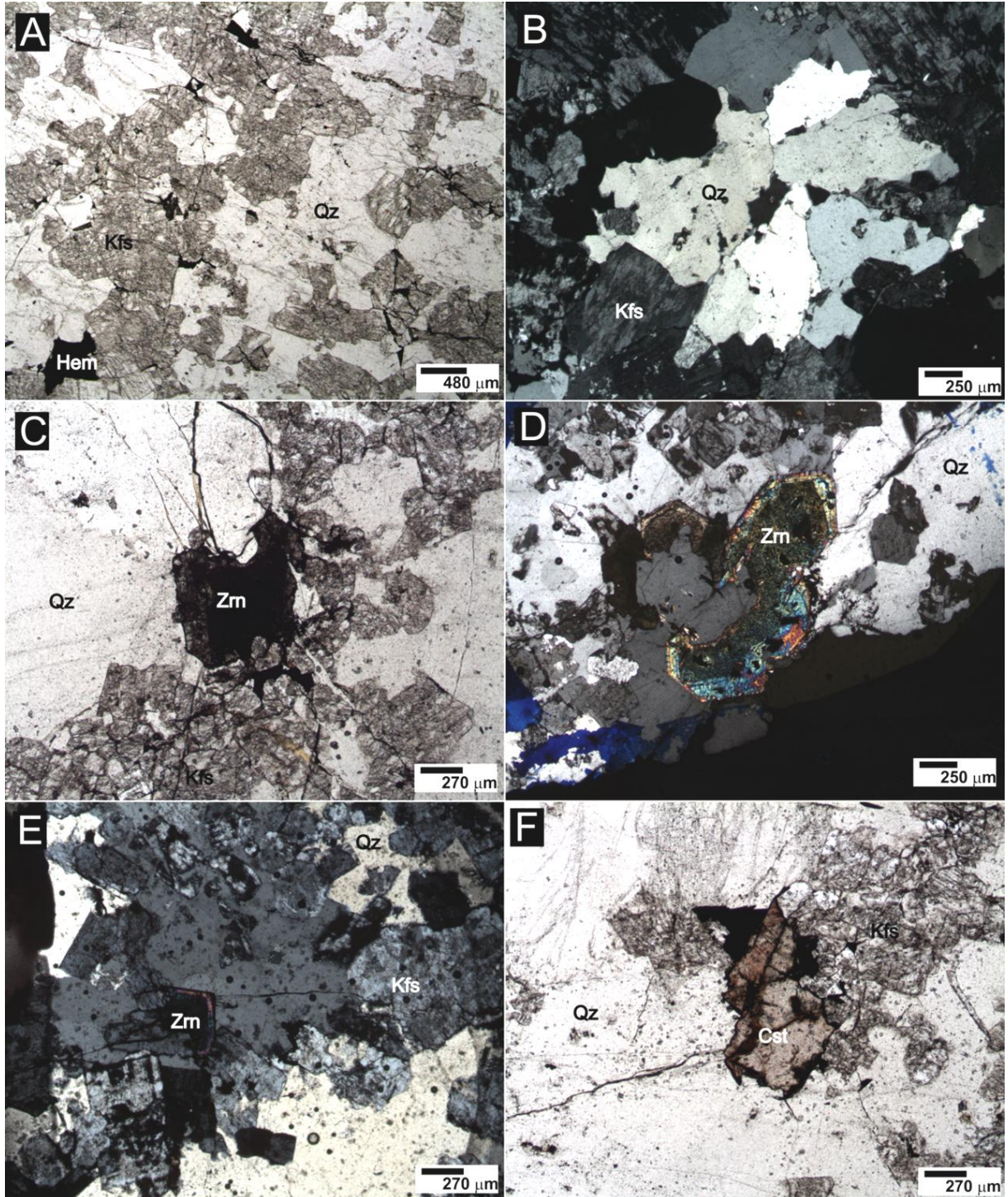
Os minerais opacos (óxidos e sulfetos) perfazem cerca de 2% da rocha. A hematita forma cristais euédricos intersticiais, por vezes preenchendo fraturas ou retorcidos. A pirita ocorre tanto disseminada, sob a forma de cristais subédricos a anédricos, finos, como preenchendo cavidades. A galena, mais rara, geralmente ocorre associada à esfalerita e pirita (substituição?). A esfalerita tem proporção modal de 1%, é subédrica a anédrica, intersticial, e apresenta exsoluções de calcopirita.

Mais raramente ocorre fengita (<1%), intersticial, associada a zircão e cassiterita, com tamanhos de 0,4 mm em zonas de contato de cristais de quartzo.

No intervalo de 22,5 a 23,0 metros, o litotipo é mais heterogêneo, com diferenciação de zonas, onde em uma delas há predominância de cristais de feldspato potássico muito finos, de aspecto turvo e fortemente impregnados por óxidos de ferro e baixo conteúdo modal de quartzo. Ocorre zircão e ainda grande quantidade de cavidades abertas, mas também ocorrem cavidades completamente preenchidas por quartzo e opacos, e outras parcialmente a totalmente preenchidas por agregados de microgrânulos avermelhados de óxidos de ferro. A outra porção é dominada por quartzo secundário, com cristais de feldspato potássico imersos na massa quartzosa, assemelhando-se ao aspecto textural poiquilítico.

Entre 26,5 e 27,3 metros apresenta-se moderadamente greisenizado, com associações mais pronunciadas de clorita e fengita (aproximadamente 5%), intersticiais ou preenchendo cavidades, associando-se a esfalerita e fluorita, esta última com elevados conteúdos.

Figura 9 – Aspectos mineralógicos e texturais do AGeEp. A) textura geral, com cristais de feldspato potássico e quartzo, essencialmente, NP; B) cristais médios agregados de quartzo, com contatos suturados com o feldspato potássico, NC; C) cristal de zircão com núcleo metamitizado e com bordas corroídas em contato com o quartzo, NP; D) cristal de zircão zonado, fortemente corroído e com inclusões de torita e columbita, NC; E) aspecto textural, com zircão e feldspato potássico parcialmente consumidos por quartzo; F) cristal de cassiterita subédrico, com manchas escuras e levemente corroído por quartzo, NP.



Fotomicrografias de luz transmitida. Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

5.3.2.1 Albita-granito de borda epissienitizado rico em sulfetos

No intervalo de 28,2 a 28,4 metros, o AGbEp apresenta granulação média a fina, sendo rico em sulfetos de granulação grossa, preenchendo cavidades. A paragênese sulfetada é constituída por pirita, galena, esfalerita e calcopirita, associada a quartzo e fluorita. Texturalmente se observam cristais de feldspato potássico parcialmente consumidos e cristais de quartzo preenchendo os interstícios dos cristais (figura 10A). Ainda, ocorrem grandes cristais de zircão metamitizado, fortemente corroídos por fluorita e fengita (figura 10B).

A pirita é subédrica e preenche cavidades, tendo dimensões entre 0,3 e 5,2 mm (figura 10C e D). Contém cavidades preenchidas por quartzo e fluorita. Ocorre também em granulação mais fina, anédrica, associada à galena, ou próxima à torita (figura 10E e F).

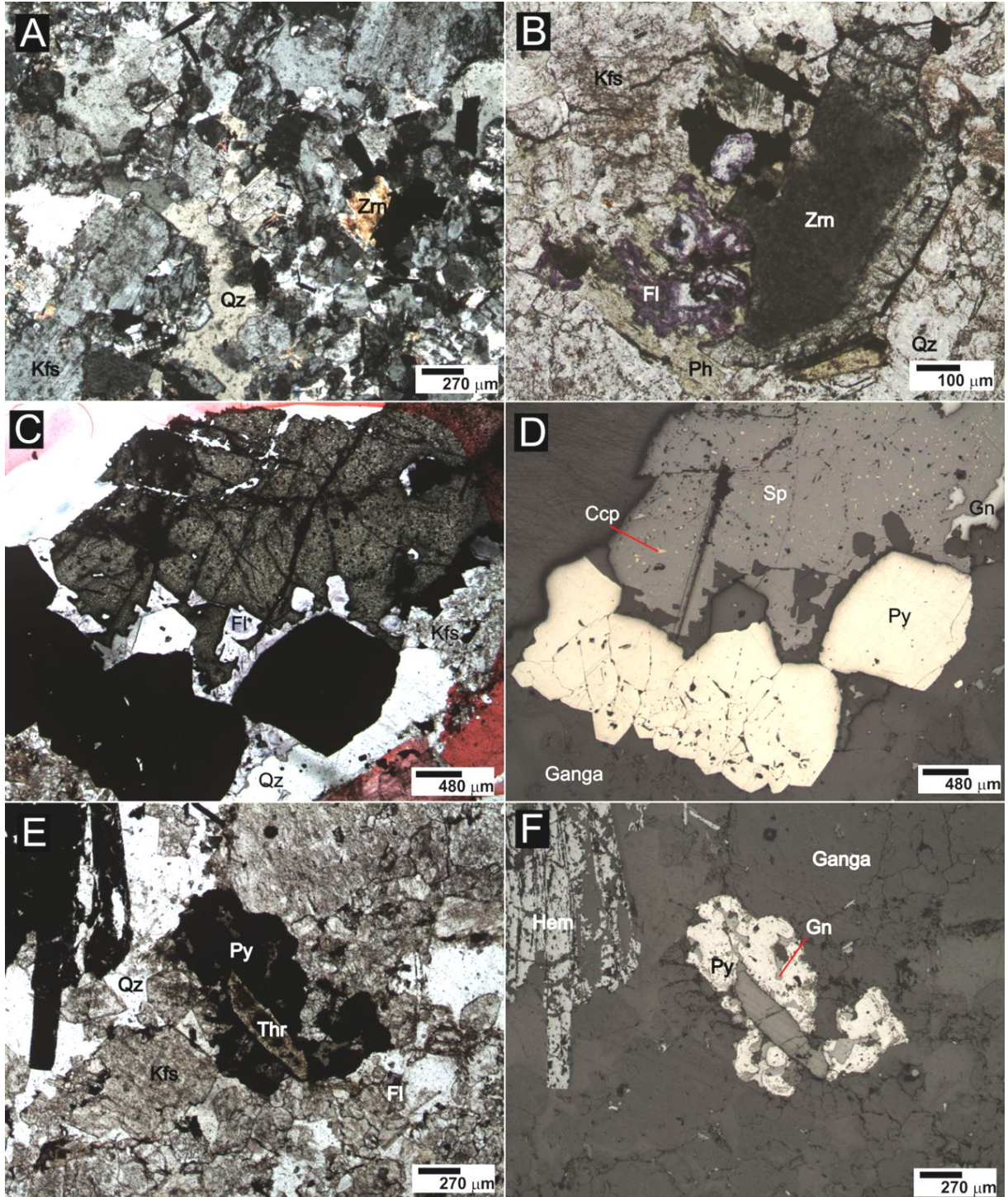
A galena é anédrica, associada à pirita. Tem inclusões de fluorita e ocorre também disseminada na rocha, intersticial, com granulação menor. Por vezes ocorre associada à esfalerita, numa relação de substituição. Ainda, apresenta-se com forma vermicular, por entre os cristais de feldspato potássico, próximos às paredes das cavidades.

A esfalerita é anédrica, intersticial e associada principalmente à galena, com dimensões entre 0,3 e 1,3 mm. Ocorre também em cavidades, associada à galena e pirita, tendo granulação maior, com tamanhos entre 1,3 e 6,3 mm e com textura de exsolução de diminutos cristais de calcopirita. É bastante fraturada, sendo corroída por fluorita.

A hematita ocorre em agregados de palhetas parcialmente corroídas. Precipita nas paredes das cavidades, por vezes quase as preenchendo completamente.

Ainda neste intervalo, se observa associação de clorita e fengita em pequenas proporções, representando leve indício de greisenização.

Figura 10 – Aspectos mineralógicos e texturais do AGeEp rico em sulfetos. A) textura geral, com cristais de feldspato potássico parcialmente consumidos e cristais de quartzo intersticiais, NC; B) cristal de zircão com núcleo metamitizado e com bordas fortemente corroídas em contato com a fluorita e fengita, NP; C) associação de sulfetos (*Sp + Py + Gn + Ccp*) preenchendo cavidade, junto a quartzo e fluorita, NP; D) idem a C, luz refletida; E) cristal de torita em associação com pirita e galena, NP; F) idem a E, com visualização dos minerais à luz refletida.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

5.3.3 Granito epissienitizado híbrido (GEpsH)

Para melhor entendimento, as rochas deste grupo foram assim denominadas em virtude de mostrar em sua textura e mineralogia as assinaturas texturais e mineralógicas das fácies FAGHP e ABGB. Uma das principais características reside na ocorrência de fases minerais representativas das duas fácies, misturadas no mesmo litotipo. Por exemplo, fases minerais como torita, zircão metamítico e cassiterita magmática (ABGB) ocorrem disseminados num arranjo textural porfirítico, com fenocristais de feldspato alcalino (FAGHP). Ainda, seu conteúdo modal de quartzo é reduzido, configurando-se como rocha epissienitizada e híbrida.

É composto essencialmente de feldspato alcalino e quartzo, tendo como fases acessórias zircão, fluorita, hematita, pirita, galena, torita e cassiterita. Os minerais de alteração compreendem clorita e fengita. Apresenta textura porfirítica a inequigranular subédrica, granulação média a grossa e encontra-se muito impregnada por óxidos de ferro. Observam-se por vezes fenocristais isolados de feldspato alcalino (figura 11A).

O feldspato alcalino tem proporções modais de 75 a 85% e ocorre basicamente sob três formas: (a) fenocristais de granulação fina a grossa, geralmente agrupados (*Kfs1*), com tamanhos entre 0,8 e 6,6 mm, subédricos, de aspecto turvo, contendo manchas irregulares com diferente orientação ótica ou, por vezes maclamento Carlsbad. Apresentam microfraturas preenchidas por óxidos de ferro e os contatos são por vezes suturados, mostrando desequilíbrio com feldspatos alcalinos mais tardios; (b) cristais com tamanhos entre 0,2 e 1,1 mm (*Kfs2*), anédricos, arranjados em agregados irregulares; (c) cristais anédricos muito finos (0,3-0,7 mm) (*Kfs3*) que constituem cerca de 50% do total de feldspatos do litotipo e comumente corroem os cristais maiores. Por vezes vêm acompanhados de fengita ou encontram-se fortemente impregnados de óxidos de ferro.

O quartzo apresenta conteúdos modais entre 5 e 15%, ocorrendo em pelo menos três tipos morfológicos: (a) cristais anédricos, de aspecto límpido e tamanhos entre 2 e 8 mm (*Qz1*) englobando minerais de *Kfs2*, zircão e opacos, com substituição parcial dos feldspatos; (b) cristais anédricos (*Qz2*) inclusos nos cristais de pirita e esfalerita em agregados, preenchendo cavidades; (c) cristais poligonais, arranjados em textura em pente (*Qz3*), preenchendo as paredes das fraturas.

O zircão perfaz 3% da rocha e apresenta-se em cristais de forma subédrica a anédrica, com dimensões entre 0,1 e 1,8 mm. A maioria deles apresenta uma borda clara, corroída e impregnada por óxidos de ferro ao redor de um núcleo escuro e metamitizado, com inclusões de hematita, fluorita, fengita, galena, pirita, columbita-tantalita ou torita. Comumente apresentam texturas de corrosão por cristais de feldspato alcalino, quartzo ou fluorita (figura 11B).

A cassiterita ocupa até 1% da rocha. Ocorre como cristais subédricos a anédricos, por vezes com forma irregular, com dimensões entre 0,1 e 2 mm. Apresentam zoneamento concêntrico a irregular e associam-se seguidamente ao zircão. São fraturados e corroídos nas bordas, tanto por feldspato alcalino quanto por fluorita (figura 11C).

A fluorita apresenta-se em cristais anédricos e disseminados pela rocha (1-2%), segundo três modos de ocorrência: (a) cristais intersticiais (*FI1*), muito abundantes, preenchendo os espaços diminutos entre os cristais de feldspato alcalino; (b) cristais (*FI2*) que substituem total ou parcialmente hematita e fengita, gerando pseudomorfos, além de cassiterita e clorita, ou então que corroem cristais de torita, zircão e pirita; (c) cristais que preenchem fraturas (*FI3*), juntamente com quartzo, em níveis onde este litotipo apresenta maior grau de fraturamento.

As fases minerais opacas são mais comuns do que no FAGHP, com proporção modal de até 3%. As fases mais comuns são pirita e hematita, ocorrendo subordinadamente galena. Os cristais de hematita são euédricos e tabulares e se acumulam em cavidades, junto a quartzo e fluorita. Em zonas enriquecidas em opacos, a hematita ocorre associada à fengita e fluorita. A pirita ocorre em cristais anédricos de dimensões entre 0,1 e 0,3 mm, disseminados na rocha em pequenas proporções. Por vezes ocorre como cristais euédricos com dimensões de até 5,2 mm, preenchendo cavidades juntamente com galena, esfalerita, zircão e torita. A galena ocorre sempre associada à pirita, tanto preenchendo cavidades (figura 11D) como formando uma coroa em torno dos cristais de torita.

A esfalerita tem proporções menores que 1%, é anédrica, com tamanhos entre 0,3 e 1 mm. É intersticial e ocorre associada à pirita, fluorita, zircão e opacos. Por vezes é corroída por quartzo e feldspato alcalino. Também ocorre preenchendo fraturas e cavidades ou substituindo gerações precoces de feldspato alcalino. Todos os cristais apresentam textura de exsolução de microcristais de calcopirita na forma de gotículas (*blebs*) (figura 11E).

A torita ocorre geralmente em associação com pirita, zircão e fluorita. Seus cristais têm forma alongada, bordas irregulares e dimensões entre 0,5 e 1 mm. O núcleo está parcialmente substituído por um mineral opaco, enquanto que suas bordas localmente apresentam coroas de pirita, galena e hematita. Por vezes ocorre impregnada de óxidos de ferro.

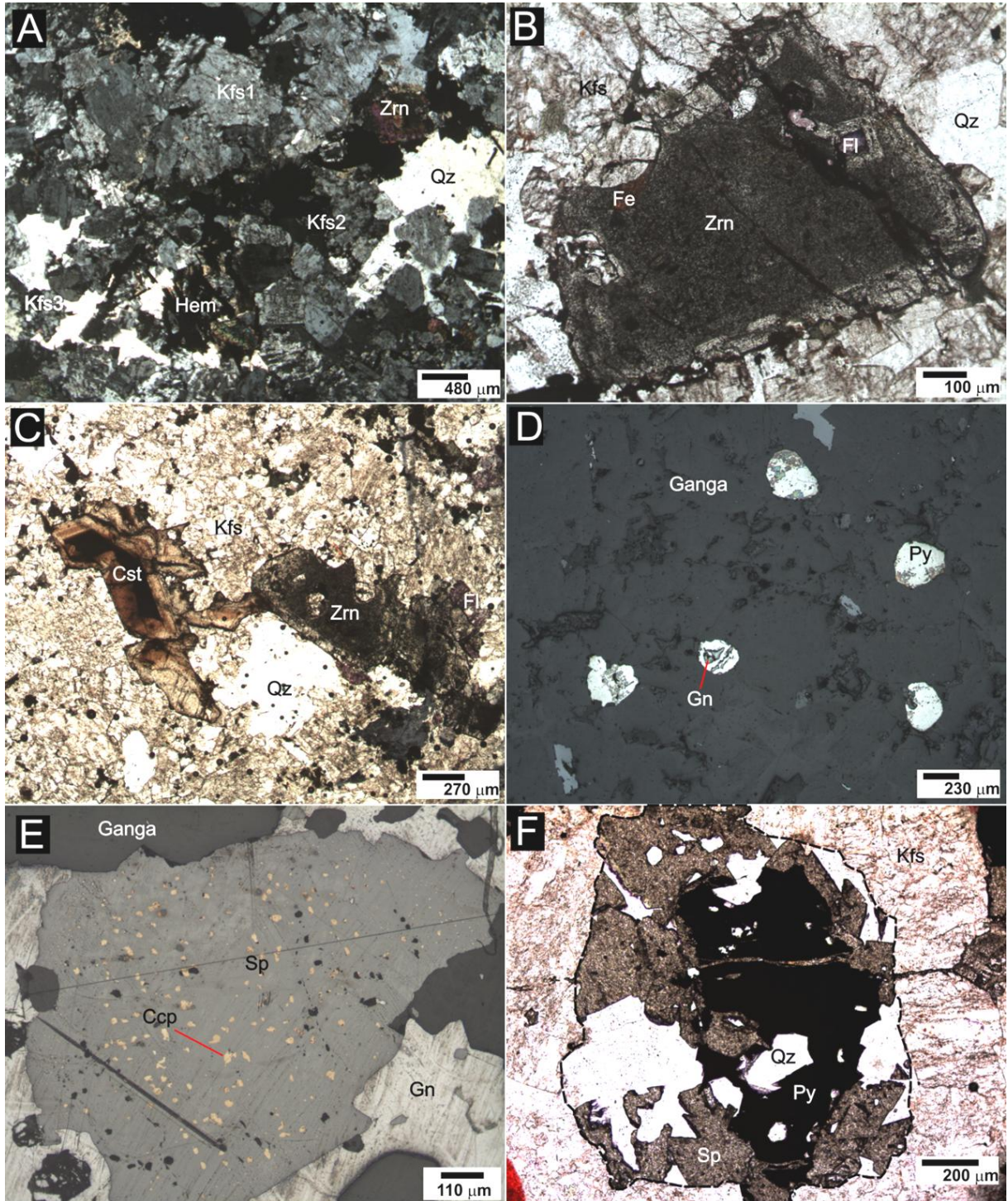
A fengita ocorre associada à hematita, fluorita, clorita e zircão. Geralmente é anédrica e disseminada na forma de finas lamelas ocupando todos os pequenos interstícios da rocha. Nessas associações a fengita é parcial ou totalmente substituída por fluorita e clorita.

A clorita é mineral de alteração, geralmente associada à pirita, fengita e fluorita, em desequilíbrio com as duas últimas.

À profundidade de 43,5 metros, a rocha apresenta elevado conteúdo de sulfetos, principalmente pirita e esfalerita, com quantidades subordinadas de galena e calcopirita. O quartzo ocorre em menores quantidades (aproximadamente 5%), tanto de forma intersticial, como incluso nos cristais de pirita. Esta, por sua vez, apresenta suas bordas corroídas nos contatos com a matriz e com a fluorita. A galena ocorre na forma de inclusão nos cristais de pirita e nas suas bordas. A esfalerita ocorre como preenchimento de fratura.

Em praticamente todas as ocorrências do litotipo no furo se observam associações minerais tais como: (a) $Kfs + Fl + Py + Gn$, onde a galena ocorre tanto de forma inclusa na pirita, quanto a corroendo em suas bordas; (b) $Py + Hem$, ambos euédricos e em equilíbrio entre si; (c) $Zrn + Thr + Py + Hem + Fl + Ph$, geralmente preenchendo cavidades; (d) $Ph + Chl$, no preenchimento de fraturas menores; (e) $Fl + Ph$, em relação de substituição e; (f) $Py + Sp + Qz$, em que a esfalerita substitui a pirita e o quartzo as corrói (figura 11F).

Figura 11 – Aspectos mineralógicos e texturais do GEpsH. A) textura geral, com fenocristais de feldspato alcalino imersos em matriz constituída basicamente de feldspato alcalino (*Kfs2*), quartzo, zircão e hematita, NC; B) zircão corroído nas bordas por feldspato alcalino e com inclusão de fluorita, NP; C) cassiterita zonada, intersticial, junto a quartzo e zircão, NP; D) fotomicrografia de luz refletida, cristais de pirita e galena; E) cristal de esfalerita com exsolução de gotículas de calcopirita, luz refletida; F) cavidade (linha tracejada) preenchida por pirita, esfalerita, quartzo e fluorita, NP.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

5.3.3.1 Granito epissienitizado híbrido hematizado

No intervalo próximo à base do furo (96,1 a 96,7 m), o grau de fraturamento é moderado e é possível visualizar zonas de cristais finíssimos de feldspato alcalino que parecem produtos de cominuição. Tem-se predominância de cristais anédricos de feldspato alcalino (90%) com tamanhos variáveis entre 0,2 e 5,5 mm (figura 12A e B).

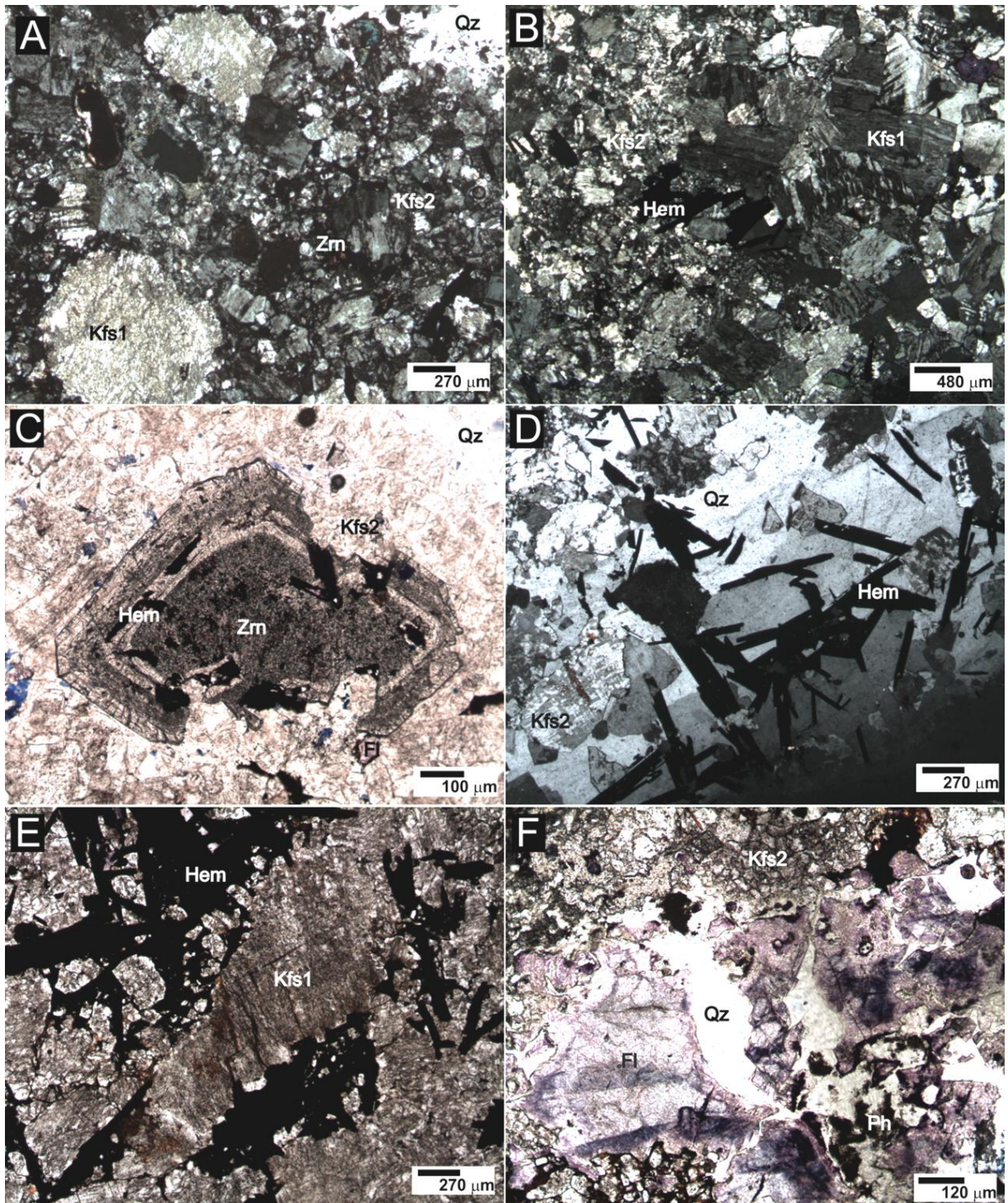
O quartzo (5%) tem tamanhos entre 0,8 e 5,3 mm, preenchendo os interstícios dos cristais. Por vezes é bem desenvolvido, englobando cristais prismáticos de minerais opacos e porções extremamente finas de feldspato. Alguns destes parecem ter sido parcialmente consumidos. Tem aspecto límpido e extinção ondulante.

O zircão (<1%) é subédrico, apresentando zoneamento concêntrico, com um núcleo contendo inclusões de opacos e fortemente impregnado de óxidos de ferro. Os cristais têm as bordas altamente corroídas. Ocorre alguma fluorita inclusa ou associada (figura 12C). Alguns cristais têm seu núcleo fortemente metamitizado.

A hematita tem teor modal de aproximadamente 5%, arranjada na forma de palhetas agrupadas, formando feixes, de granulação média. Ocorre principalmente preenchendo cavidades, a partir das paredes, e também ocorre disseminada na matriz, sempre associada ao quartzo e fluorita (figura 12D e E).

A fluorita (1%) é abundante, cor arroxeadada, preenche cavidades e ocorre inclusa nas fases de feldspato alcalino e zircão. Associada aos opacos e quartzo. É também intersticial (figura 12F).

Figura 12 – Aspectos mineralógicos e texturais do GEpsH hematitizado. A) textura geral, com fenocristais subédricos a anédricos de *Kfs1* imersos em matriz fina de *Kfs2* e Qz, NC; B) aspecto textural dos fenocristais de feldspato alcalino, como agregados imersos na matriz mais fina, NC; C) cristal de zircão com zonamento, bordas fortemente corroídas, com inclusões de hematita e outros óxidos de ferro, NP; D) disposição geral dos cristais de hematita, NC; E) disposição dos cristais de feldspato alcalino em zonas fraturadas, com comportamento quebradiço e cominuído, NP; F) fluorita preenchendo fraturas, com fraturamento tardio e preenchimento de quartzo e fengita, NP.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

5.3.3.2 Granito epissienitizado híbrido silicificado

Nas profundidades de 64,0 e 69,5 metros, o GEpsH apresenta significativas modificações texturais. É moderadamente fraturado, com granulação grossa e textura inequigranular subédrica. O conteúdo de feldspato alcalino é relativamente reduzido (50%), enquanto que o teor de quartzo (45%) é bem maior, se comparado aos teores comuns do litotipo (figura 13A).

O quartzo ocorre em pelo menos três formas: (a) cristais muito pequenos (Qz1), com tamanhos entre 0,3 e 1 mm, euédricos; (b) cristais intersticiais (Qz2), de aspecto límpido, perfazendo 95% do total de quartzo. Preenche espaços formados pela corrosão em cristais de zircão e feldspato alcalino, bem como preenche cavidades na rocha, em associação à fluorita, pirita e hematita; (c) cristais de preenchimento de fraturas (Qz3), policristalinos no espaçamento das fraturas, com tamanhos entre 0,2 e 0,3 mm. Por vezes, em fraturas, ocorre quartzo mono e policristalino. As fraturas ora são espaçadas e preenchidas, ora apenas modificam o comportamento ótico dos minerais (figura 13B).

O zircão (1%) ocorre na forma de cristais euédricos a subédricos, com tamanhos entre 0,6 e 2 mm, fortemente fragmentados e fraturados. São zonados, fortemente corroídos, e apresentam inclusões de columbita no núcleo (figura 13C).

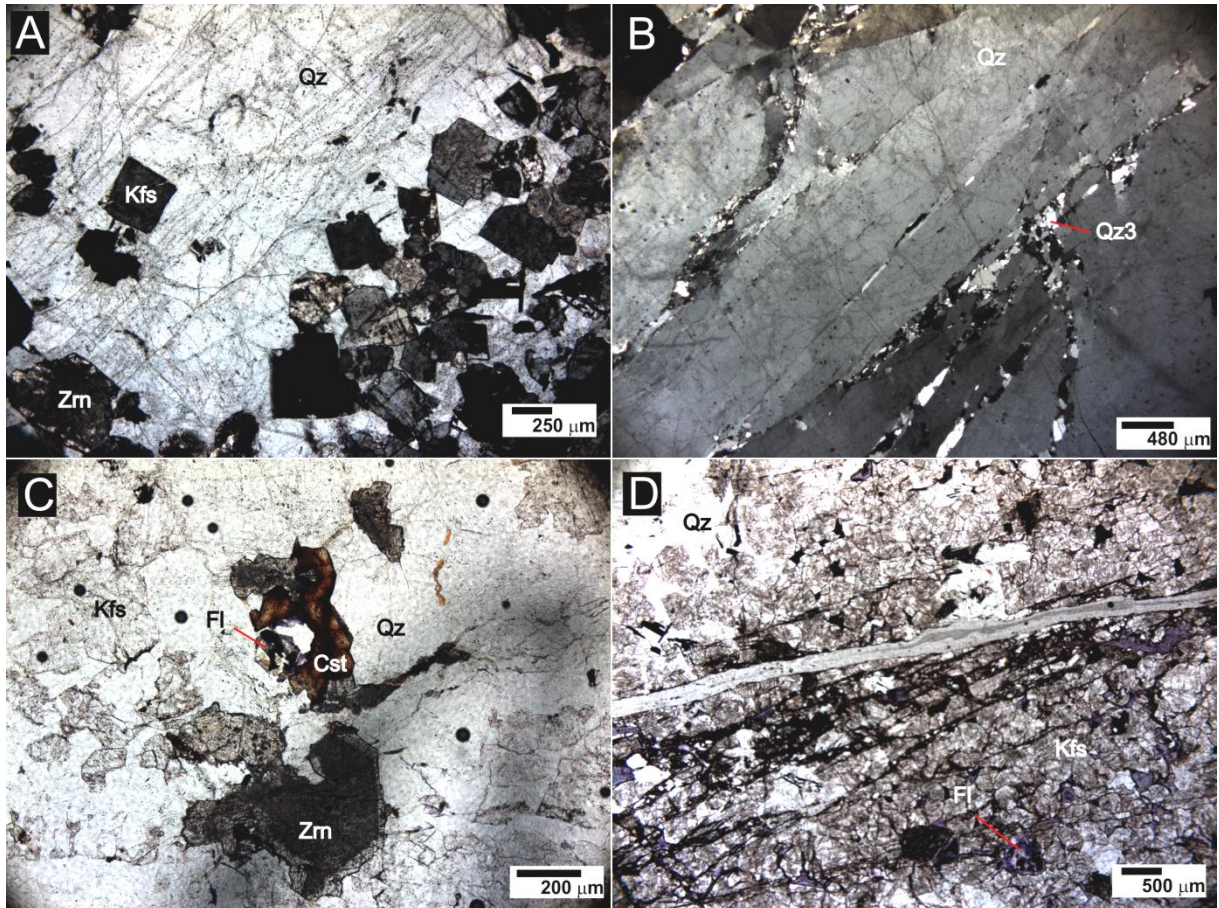
A fluorita tem proporção modal de 1%, e ocorre em cristais anédricos preenchendo cavidades e substituindo galena e/ou pirita.

Os minerais opacos estão presentes em proporções muito pequenas e ocorrem da seguinte forma: (a) cristais de pirita euédricos e/ou subédricos, associados à torita, fluorita, quartzo e galena; (b) cristais euédricos de hematita, de granulação média a fina, em agregados juntamente com quartzo; (c) cristais de pirita e hematita preenchendo algumas fraturas.

Subordinadamente ocorrem torita (<1%), em cristais euédricos a subédricos, sempre em associação com pirita euédrica; cassiterita (<1%), em cristais euédricos a subédricos, zonados; e clorita, associada à fluorita e pirita.

À profundidade de 69,5 metros, o litotipo apresenta alto grau de fraturamento, com cristais de feldspato alcalino fortemente impregnados por óxidos de ferro (figura 13D). Na zona de contato com o AGbEp, o granito epissienitizado híbrido silicificado apresenta alto conteúdo de fluorita, que ocorre preenchendo os interstícios dos feldspatos alcalinos e fraturas, além de substituir minerais opacos.

Figura 13 – Aspectos mineralógicos e texturais do GEpsH silicificado. A) textura geral, com cristais de feldspato alcalino euédricos englobados pela massa quartzosa, NC; B) próximo a 69,5 metros, porção dominada por quartzo fortemente fraturado, com preenchimento de quartzo tardio nas fraturas e raros grânulos de óxido de ferro, NC; C) grande conteúdo de quartzo e menor teor de feldspato alcalino, com cristais de cassiterita e zircão, NP; D) aspecto textural do litotipo próximo do contato com a porção descrita em B, fortemente fraturado, com preenchimento das fraturas por fluorita e quartzo, NP.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

6 CARACTERIZAÇÃO DE FASES MINERAIS ATRAVÉS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A utilização do microscópio eletrônico de varredura possibilitou a identificação de fases minerais de difícil visualização ao microscópio petrográfico, através da obtenção de imagens por elétrons retroespalhados (ERE) e da realização de análises químicas semiquantitativas por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS).

Foram também realizados estudos em cristais de quartzo, zircão e cassiterita, através da obtenção de imagens por catodoluminescência (CL). As análises químicas por EDS em alguns destes cristais foi importante para quantificar a concentração de elementos-traço em zonas com diferentes intensidades de CL.

A análise destes cristais por MEV-CL-EDS teve por objetivo caracterizar os padrões texturais de CL e a composição química de minerais formados no estágio magmático, pela possível mistura e interação entre dois líquidos, bem como durante o estágio hidrotermal (epissienitização potássica).

Os resultados dos estudos em MEV são apresentados a seguir.

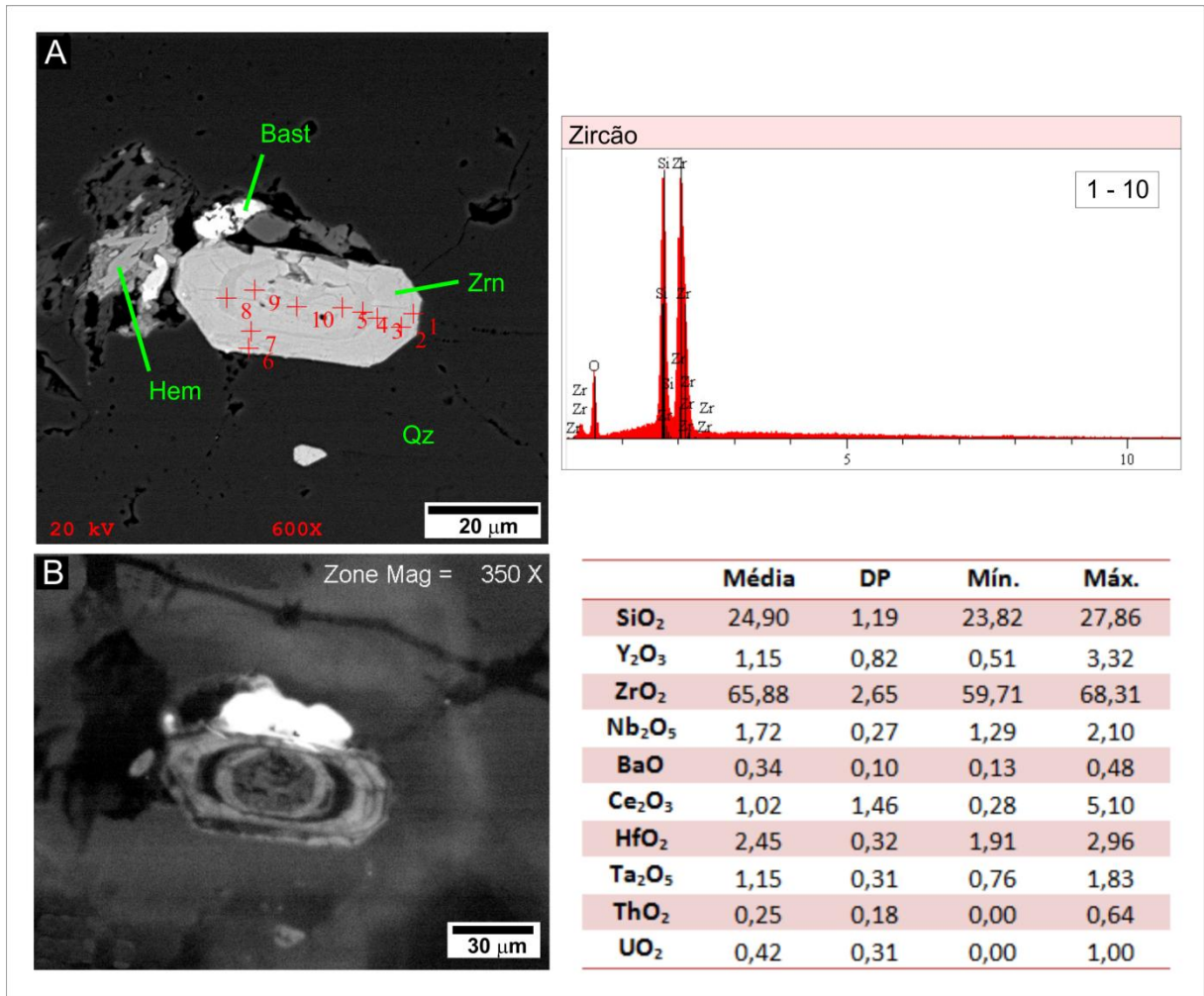
6.1 FELDSPATO ALCALINO-GRANITO *HIPERSOLVUS* PORFIRÍTICO (FAGHP)

Neste litotipo foram analisados cristais de zircão e quartzo, além de xenotímio e bastnasita na porção levemente greisenizada. Tais fases minerais são caracterizadas abaixo.

6.1.1 Zircão

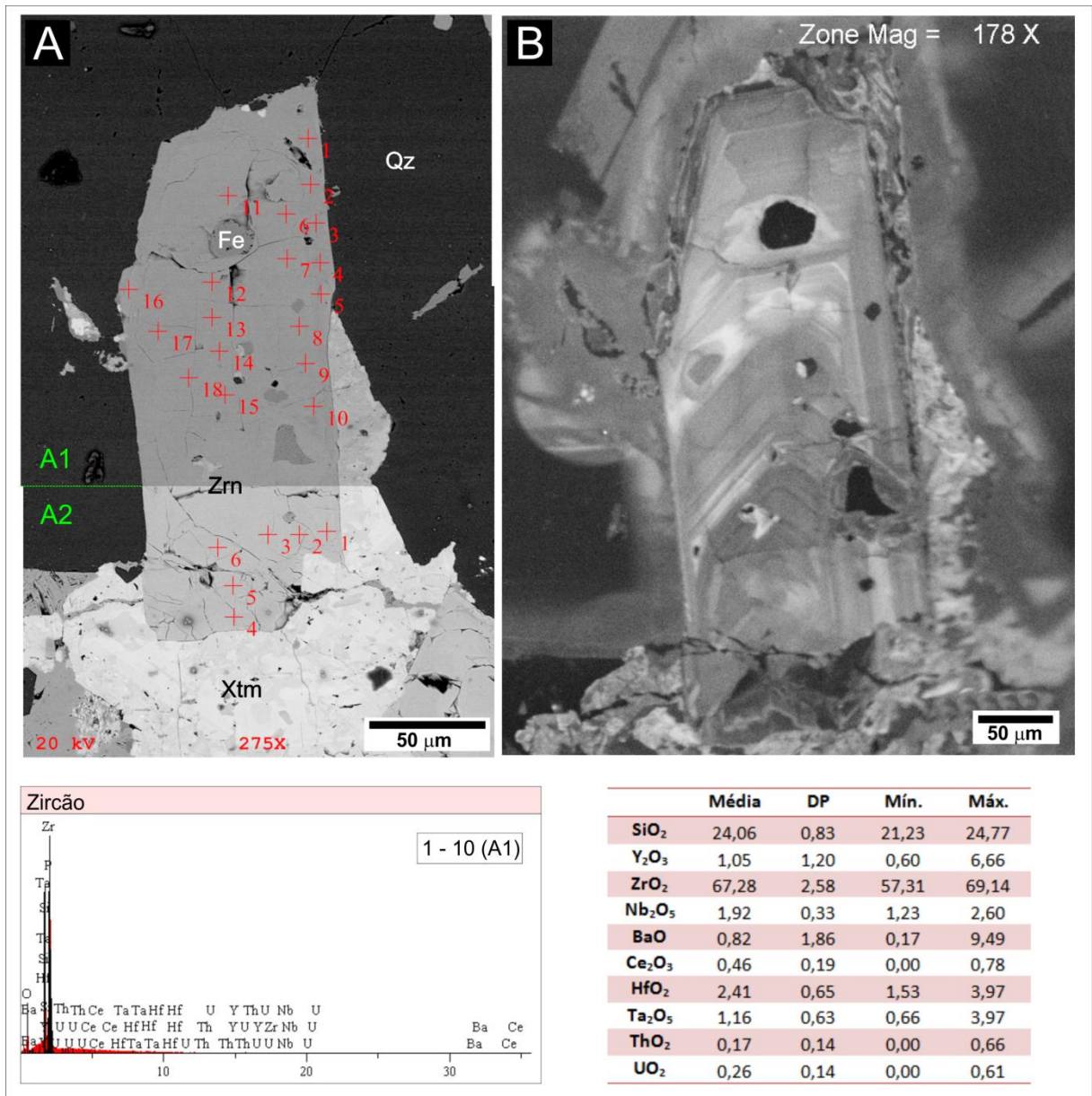
Os zircões são euédricos e apresentam zoneamento composicional ressaltado pela variação nas intensidades de CL, de cinza escuro a cinza claro (figura 14B). As variações composicionais detectadas foram: SiO₂ entre 21,23 e 27,86%; P₂O₅ de 0 a 3,33%; CaO de 0,04 a 1,03%; Y₂O₃ de 0,51 a 6,66%; ZrO₂ de 57,31 a 69,14%; Nb₂O₅ de 1,23 a 2,60%; BaO de 0,13 a 9,49%; Ce₂O₃ de 0 a 5,10%; HfO₂ de 1,53 a 3,97%; Ta₂O₅ de 0,66 a 3,97%; ThO₂ de 0 a 0,66% e; UO₂ de 0 a 1,00% (tabela no anexo B).

Figura 14 – Aspectos do zircão do FAGHP. A) Imagem obtida com ERE, mostrando associação de zircão com hematita e bastnasita, com respectivo espectro ao lado, obtido por EDS, representativo das análises pontuais de 1 a 10; B) Zoneamento composicional do zircão da figura A, ressaltado pelo contraste de intensidade de CL, em que as zonas mais claras são mais ricas em Hf. Ao lado, tabela indicando os teores máximo e mínimo, além da média e desvio padrão (DP) dos principais óxidos.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

Figura 15 – Análises composicionais de zircão do feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico. A) Imagem obtida com ERE (montada em mosaico de fotos), mostrando associação de zircão com xenotímio, com respectivo espectro abaixo, obtido por EDS, representativo das análises pontuais de 1 a 10; B) Zoneamento composicional do zircão da figura A, ressaltado pelo contraste de intensidade de catodoluminescência, onde as regiões de borda e zonas mais claras são mais enriquecidas em Hf. Abaixo, tabela indicando os teores máximo e mínimo, média e desvio padrão (DP) dos principais óxidos em composição química semiquantitativa.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

6.1.2 Quartzo

Foram analisados fenocristais e gerações tardias de quartzo por catodoluminescência. Os cristais mostram zoneamento composicional.

Na maioria dos fenocristais se observa a presença de um núcleo homogêneo com baixa intensidade de catodoluminescência, relacionada, provavelmente, a baixos teores de Ti e Al (GÖTZE et al., 2004; MÜLLER; SELTMANN; BEHR, 2000), sendo definida como o primeiro estágio de cristalização do quartzo. Ainda, se tem uma zona de borda espessa com alta intensidade de CL (figura 16A), sendo o segundo estágio de crescimento do cristal. Este alto contraste de CL indica mudança nas características químicas do líquido ao longo do processo de fracionamento. No entanto, alguns fenocristais mostram mais de duas zonas com diferentes intensidades de CL (figura 16B). Podem ser identificados cristais precoces reabsorvidos e englobados por cristais tardios, mais luminescentes.

Estas diferenças de intensidade de CL podem ser observadas dentro de um mesmo cristal e refletem pequenas mudanças composicionais devido a defeitos em sua rede cristalina, que permitem a entrada de íons estranhos na composição.

Figura 16 – Aspectos texturais em cristais de quartzo do feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfírico (FAGHP). Em ambos, as bordas do fenocristal apresentam texturas de reação com a matriz da rocha. A) fenocristal mostrando zonas com alto contraste de CL entre o núcleo e a borda, com detalhe ao lado; B) imagem por CL de cristal subédrico de quartzo, com embaiamentos formados por corrosão, com detalhe ao lado. Imagens montadas em mosaico de fotos.

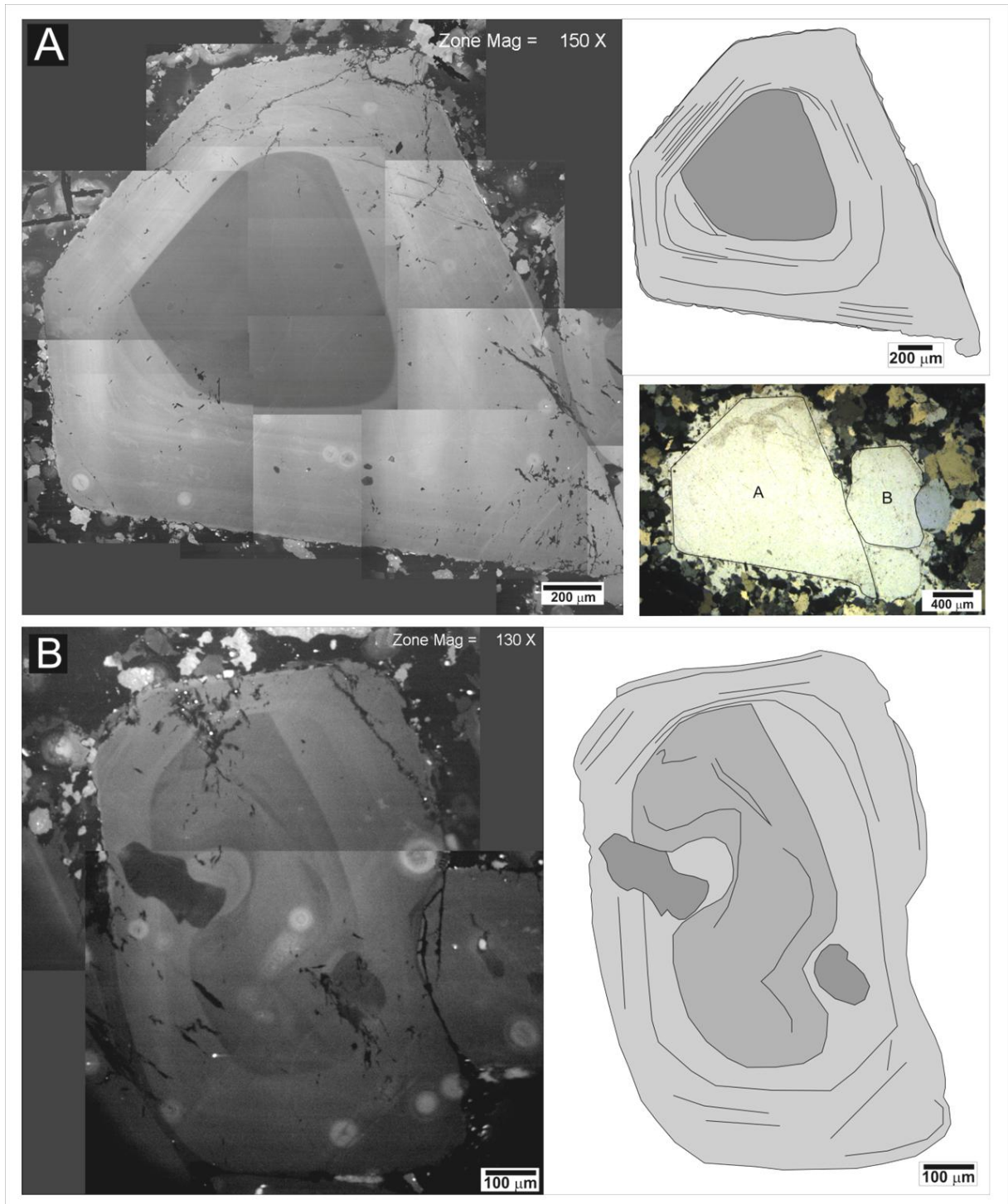
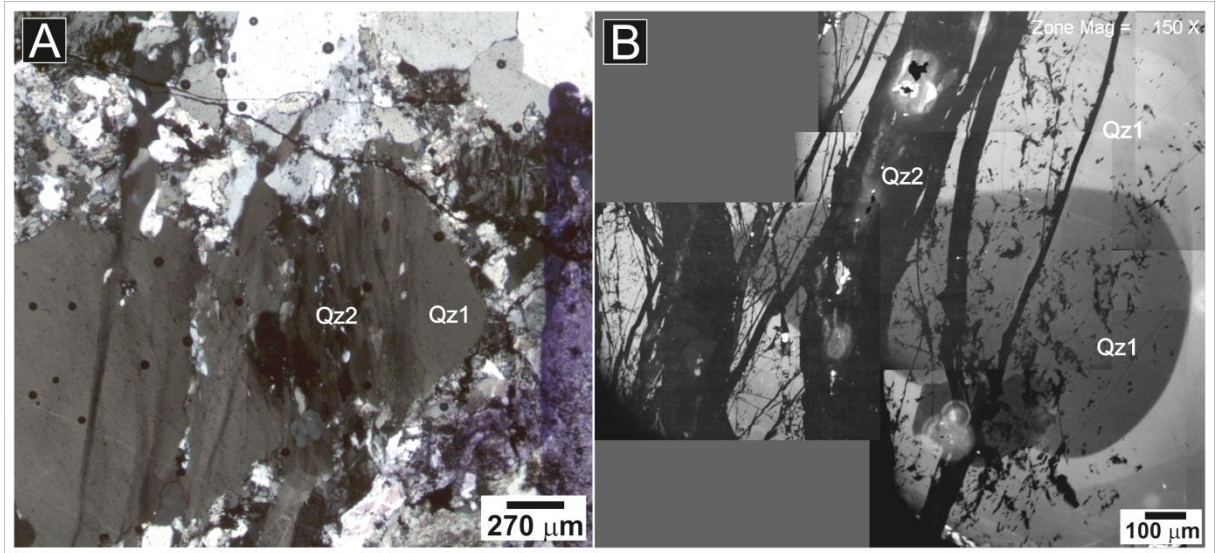


Figura 17 – Feições texturais mostrando a relação entre duas gerações de cristais de quartzo no FAGHP. A) fotomicrografia a nicois cruzados; B) O quartzo magmático (Qz1) apresenta cristais com núcleo escuro, enquanto que as bordas são claras, com maior intensidade de CL. O quartzo hidrotermal (Qz2) foi depositado nas fraturas que cortam o Qz1, e seus cristais apresentam-se completamente escuros e homogêneos. Imagens montadas em mosaico de fotos.

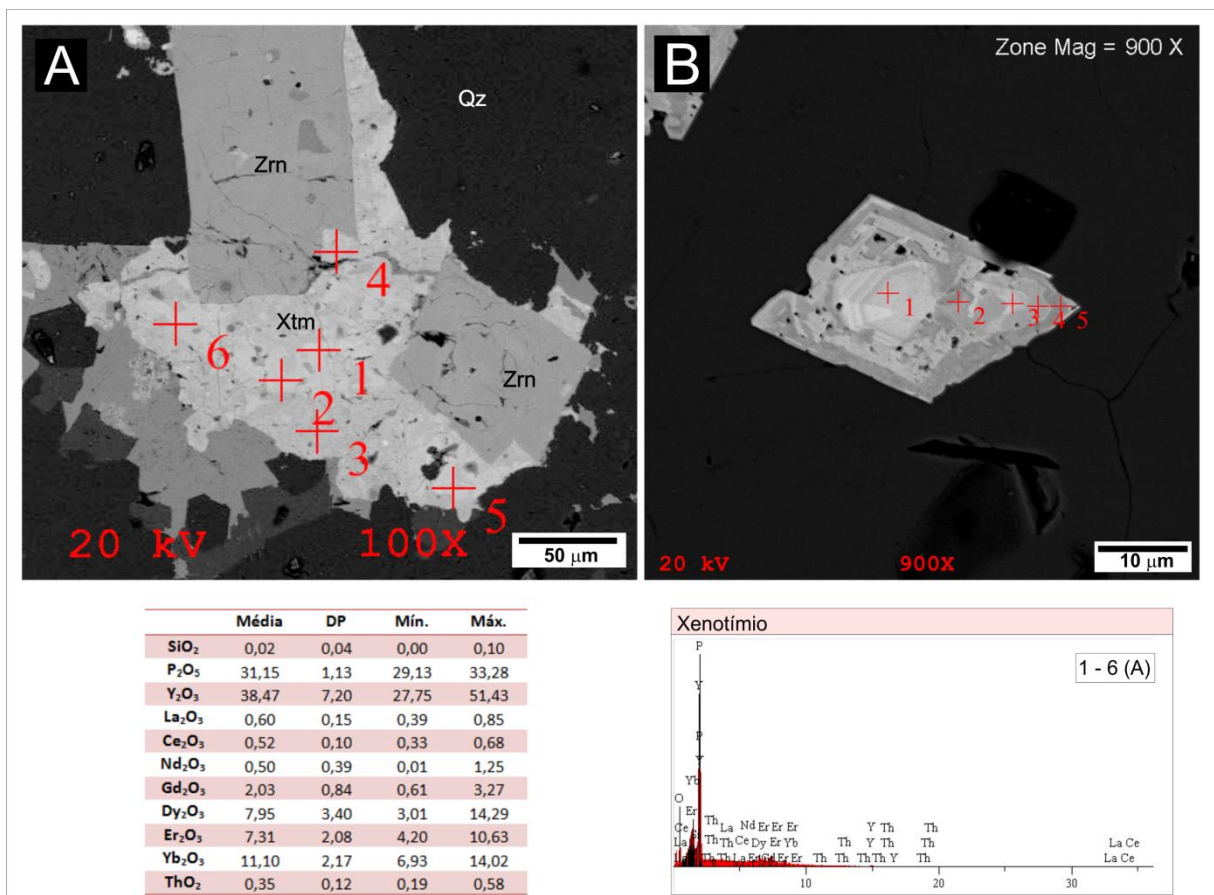


Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

6.1.3 Xenotímio

Os cristais de xenotímio [(Y, ETRP) PO₄] normalmente ocorrem em associação com zircão e apresentam zonação irregular nas imagens de elétrons retroespalhados. Mostram teores de SiO₂ de 0 a 0,11%; P₂O₅ de 29,13 a 33,28%; Y₂O₃ de 27,75 a 51,43%; La₂O₃ de 0,39 a 0,85%; Ce₂O₃ de 0,33 a 0,68%; Nd₂O₃ de 0,01 a 1,25%; Gd₂O₃ de 0,61 a 3,27%; Dy₂O₃ de 3,01 a 14,29%; Er₂O₃ de 4,20 a 10,63%; Yb₂O₃ de 6,93 a 14,02% e; ThO₂ de 0,19 a 0,58% (tabela no anexo C).

Figura 18 – Imagens obtidas com ERE, destacando as feições texturais do xenotímio. A) cristais anédricos associados a zircões euédricos, com zonas escurecidas irregulares; B) cristal euédrico, apresentando zoneamento em imagem de elétrons retroespalhados, mostrando maior enriquecimento em Y e Yb nas zonas escurecidas, ao passo que as zonas mais claras são enriquecidas em Nd, Gd e Dy. Abaixo, tabela indicando os teores máximo, mínimo, média e desvio padrão (DP) dos principais óxidos e espectro composicional semiquantitativo, obtido por EDS.



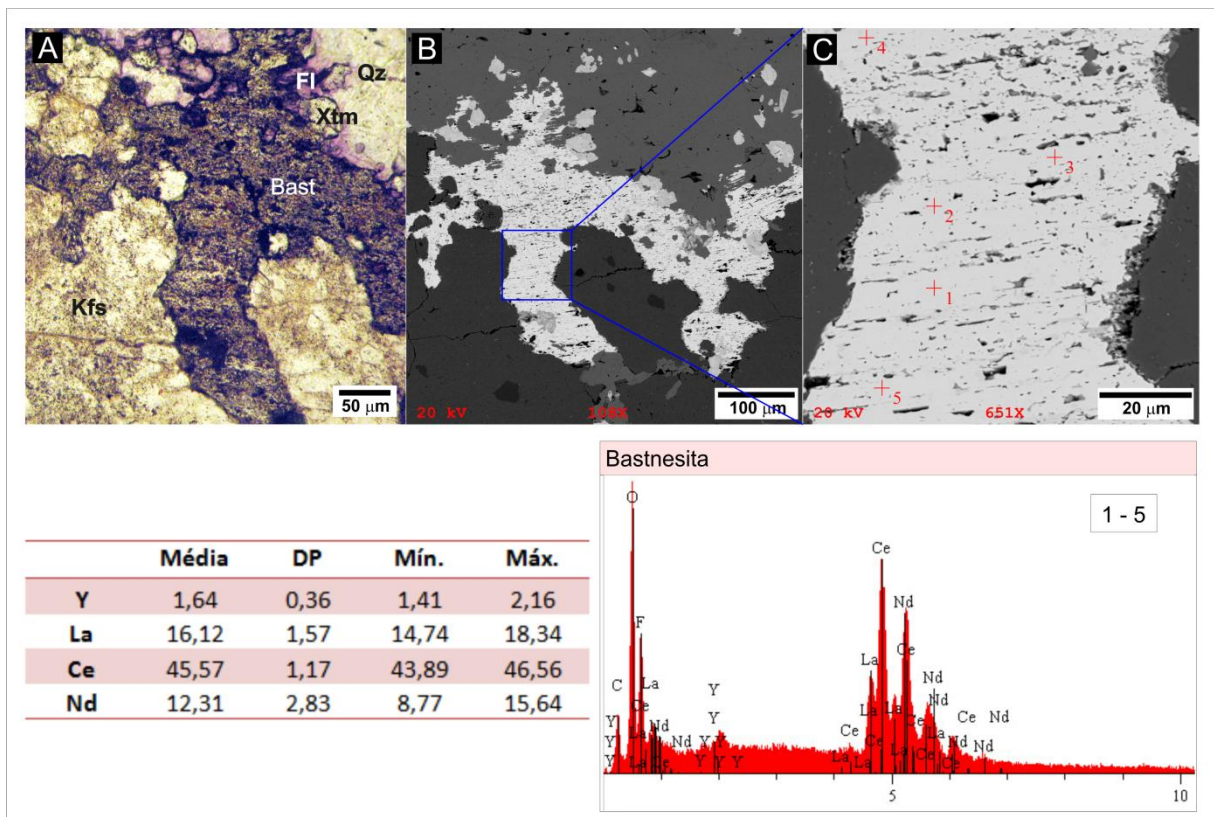
Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

6.1.4 Bastnasita

A bastnasita [(Ce,La,Nd)(CO₃)F] é um fluorcarbonato de ETR. No caso em estudo, o principal ETR é o cério (Ce). É um mineral relativamente comum em rochas alcalinas e, particularmente nos granitos da Província Pitinga, sendo sua ocorrência bem documentada (LENHARO; POLLARD; BORN, 2000; LENHARO; MOURA; BOTELHO, 2002; PIRES, 2005; COSTI et al., 2009).

Foi analisado um cristal de preenchimento de cavidades com teores de Y₂O₃ de 1,31 a 2,75%; La₂O₃ de 17,29 a 21,51%; Ce₂O₃ de 51,41 a 64,95% e; Nd₂O₃ de 10,23 a 18,24% (tabela no anexo D).

Figura 19 – Feições morfológicas e texturais da bastnasita. A) aspecto textural da bastnasita, em associação com quartzo, fluorita e xenotímio, fotomicrografia de luz natural; B) imagem obtida com ERE, mostrando sua forma irregular, com detalhe em (C). Abaixo, tabela indicando os teores máximo, mínimo, média e desvio padrão (DP) dos principais óxidos e espectro composicional semiquantitativo, obtido por EDS.



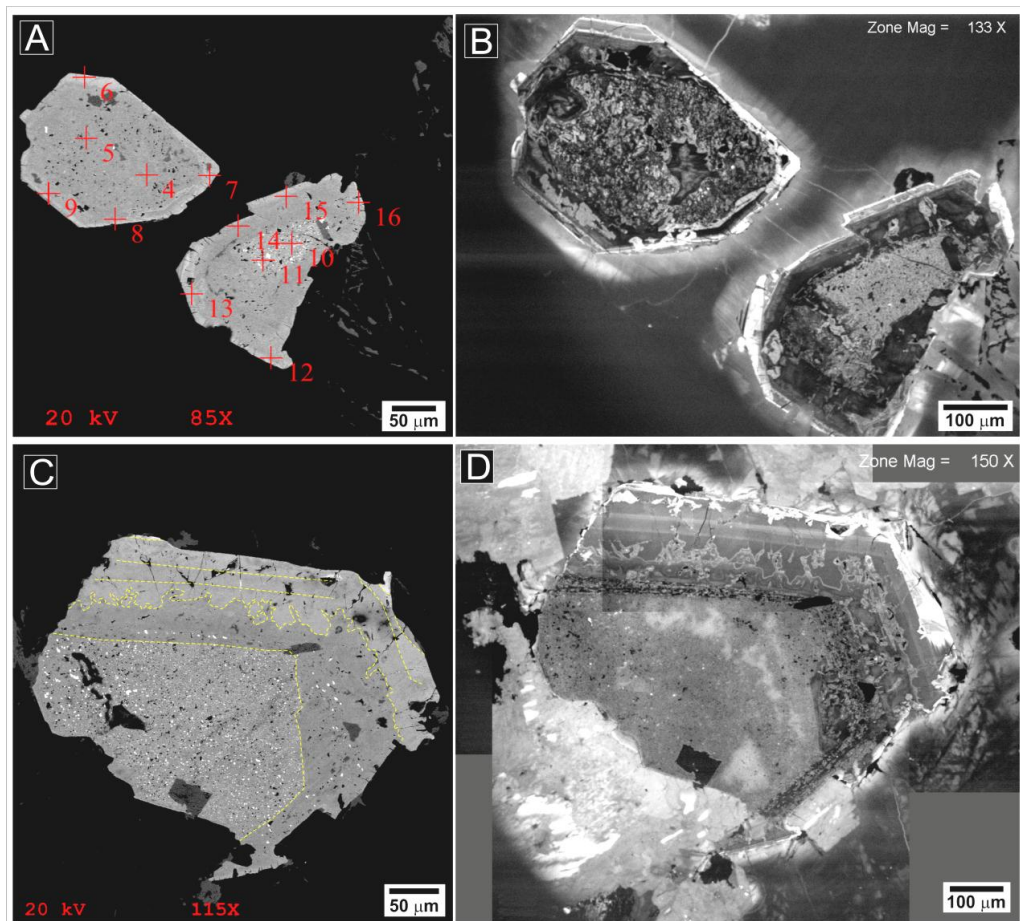
Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

6.2 ALBITA-GRANITO DE BORDA EPISSIENITIZADO (AGbEp)

6.2.1 Zircão

Neste litotipo os zircões são euédricos a subédricos e apresentam seus núcleos fortemente alterados, mostrando, nas imagens de catodoluminescência, zoneamento irregular e bordas ricas em Hf (figura 20). Foram obtidos teores para SiO_2 de 23,34 e 24,64%; P_2O_5 de 0,00 a 1,14%; CaO de 0,07 a 0,72; Y_2O_3 de 0,54 a 1,16%; ZrO_2 de 62,73 a 67,60%; Nb_2O_5 de 0,84 a 2,88%; BaO de 0,16 a 0,62%; Ce_2O_3 de 0,25 a 0,89%; HfO_2 de 2,20 a 8,50%; Ta_2O_5 de 0,55 a 1,54%; ThO_2 de 0,00 a 1,23% e; UO_2 de 0,15 a 0,87% (tabela no anexo E).

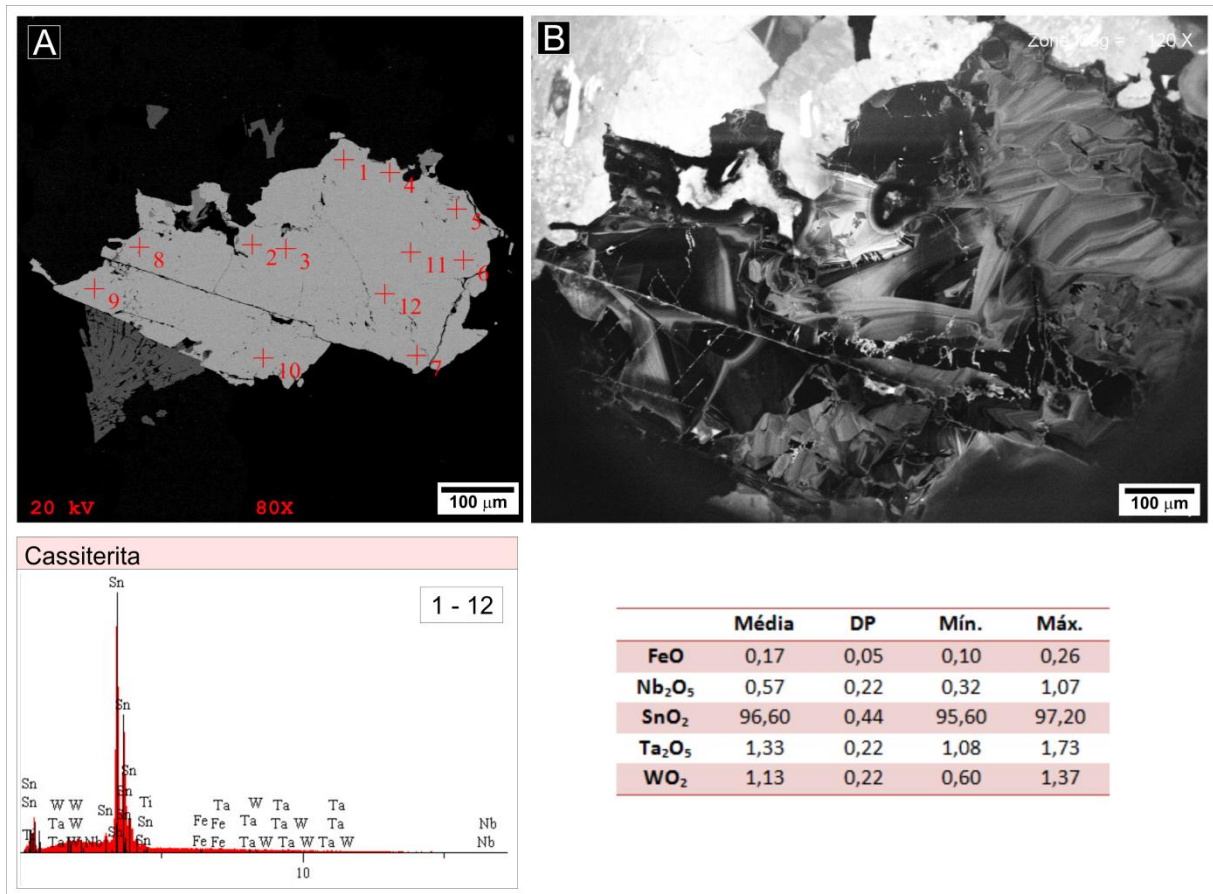
Figura 20 – Aspectos morfológicos do zircão do albita-granito de borda epissienitizado (AGbEp). A) Imagem obtida com ERE, com distinção de núcleo-borda, onde o núcleo encontra-se intensamente metamitizado, com inclusões de columbita; B) imagem de CL dos mesmos cristais de A; C) cristal de zircão com núcleo fortemente metamitizado e bordas de reação, ressaltadas pelas linhas tracejadas amarelas; D) zoneamento composicional do zircão da figura C, ressaltado pelo contraste de intensidade de CL.



6.2.2 Cassiterita

Os cristais analisados apresentaram a seguinte variação composicional: FeO: 0,10 a 0,26%; Nb₂O₅: 0,32 a 1,07%; SnO₂: 95,60 a 97,20%; Ta₂O₅: 1,08 a 1,73% e; WO₂: 0,60 a 1,37% (tabela no anexo F). Em CL, de maneira geral, as porções escuras são mais ricas em Nb, enquanto que as porções mais claras são enriquecidas em Ta. (figura 21B). Conforme será discutido adiante, a cassiterita abaixo analisada é textural e composicionalmente distinta da cassiterita magmática presente no albita-granito de núcleo e de borda (COSTI, 2000), também analisadas neste trabalho, para efeitos de comparação.

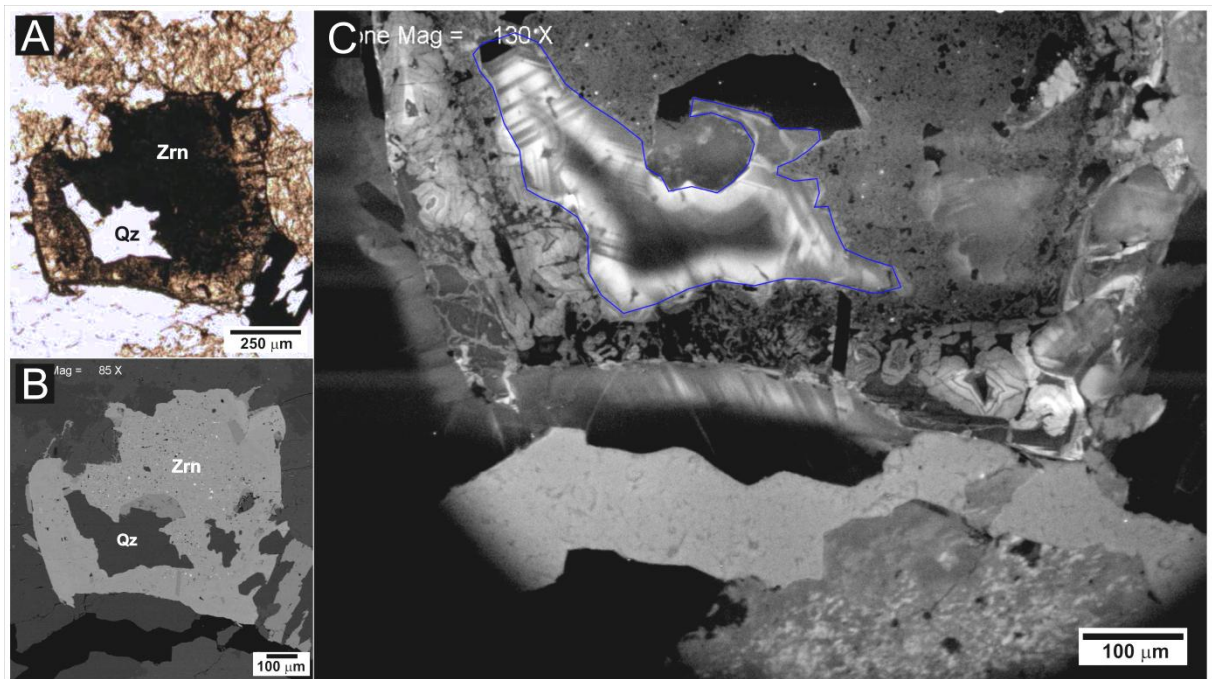
Figura 21 – Aspectos morfológicos da cassiterita do AGbEp. A) cristal subédrico, com bordas irregulares, provavelmente devido à corrosão, em imagem obtida por ERE; B) o mesmo cristal de A, mostrando zoneamento regular interno, conferido pela alternância de bandas claras e escuras, decorrente de alto contraste de intensidade de CL. Abaixo, espectro composicional semiquantitativo e tabela indicando os teores máximo, mínimo, média e desvio padrão (DP) dos principais óxidos.



6.2.3 Quartzo

Foram analisados cristais de quartzo formados durante a reação do zircão magmático metamitizado do albita-granito de borda com os fluidos hidrotermais envolvidos na epissienitização. Na realidade, este quartzo representa a silicificação tardia do processo hidrotermal, que também afetou o zircão, causando corrosão e recristalização nas suas bordas (figura 22).

Figura 22 – Aspectos texturais do quartzo hidrotermal formado durante o estágio de silicificação tardia do AGbEp. A) Imagem a nicois paralelos, mostrando quartzo incluído no zircão; B) mesma imagem, obtida por elétrons retroespalhados; C) em imagem de CL, notando-se texturas de corrosão do zircão do albita-granito de borda, gerando bordas recristalizadas (AMT-2: 22,30 m).



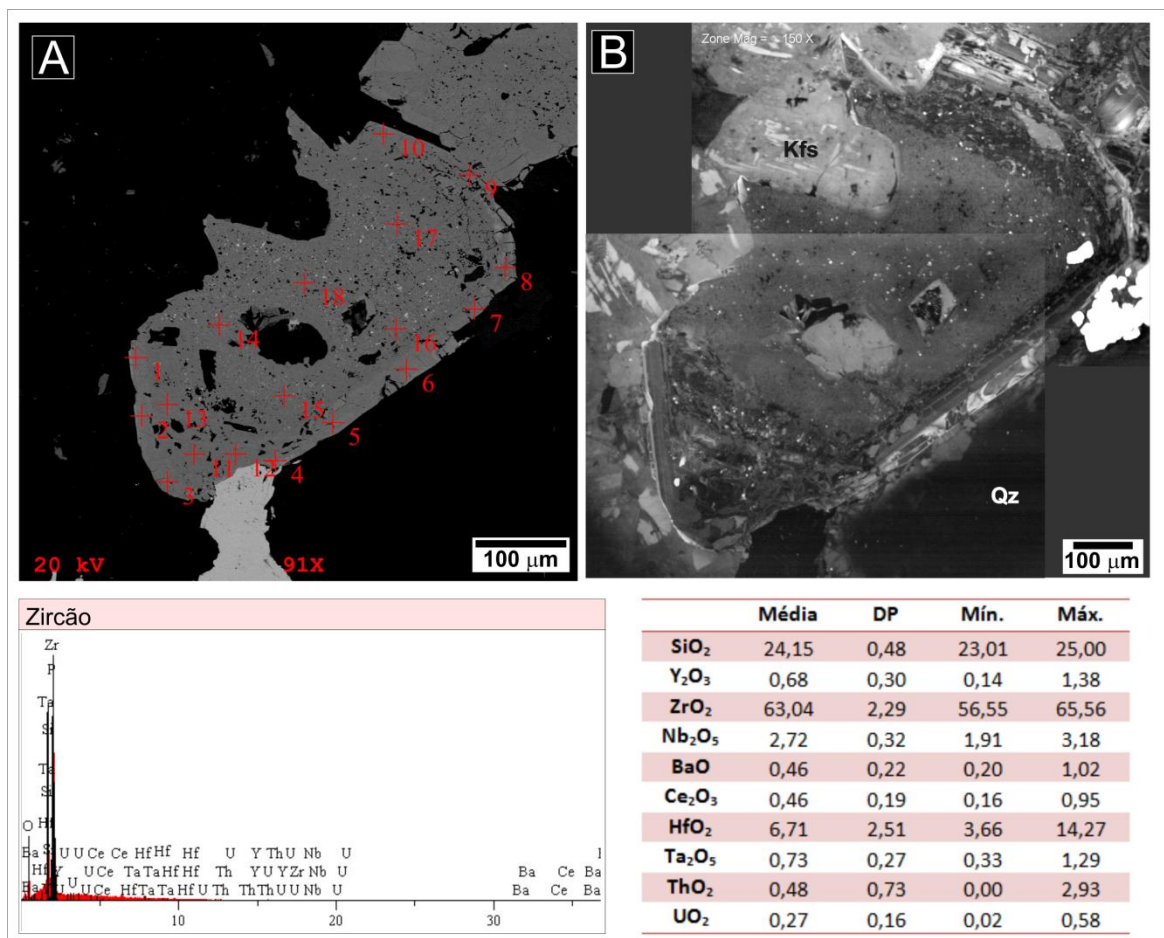
Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

6.3 GRANITO EPISSIENITIZADO HÍBRIDO (GEpsH)

6.3.1 Zircão

Os zircões deste litotipo são euédricos a subédricos, semelhantes aos zircões do AGbEp, com núcleo fortemente metamitizado, e bordas muito corroídas (figura 23). Foram obtidos os seguintes teores: SiO₂: de 23,01 a 25%; P₂O₅: de 0 a 0,58%; CaO: de 0,05 a 0,63%; Y₂O₃: de 0,14 a 1,38%; ZrO₂: de 61,79 a 65,56%; Nb₂O₅: de 1,91 a 3,18%; BaO: de 0,24 a 1,02%; Ce₂O₃: de 0,16 a 0,95%; HfO₂: de 3,66 a 14,27%; Ta₂O₅: de 0,33 a 1,29%; ThO₂: de 0,03 a 2,93% e; UO₂: de 0,02 a 0,58% (tabela no anexo G).

Figura 23 – Aspectos morfológicos do zircão do GEpsH. A) Imagem de ERE, com com contraste núcleo-borda pouco acentuado e textura de corrosão das bordas por feldspato alcalino; B) imagem em catodoluminescência do mesmo cristal de A, com melhor distinção núcleo-borda. Abaixo, espectro composicional semiquantitativo e tabela indicando os teores máximo, mínimo, média e desvio padrão (DP) dos principais óxidos.

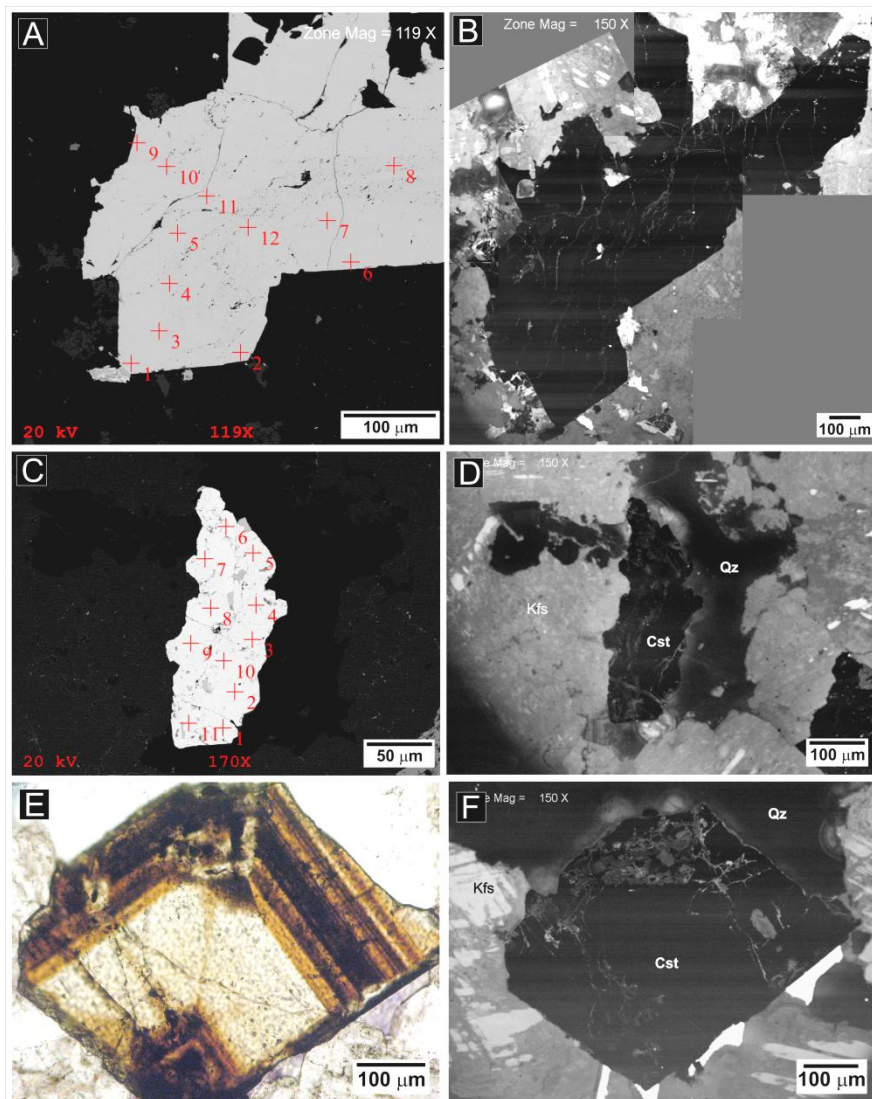


Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

6.3.2 Cassiterita

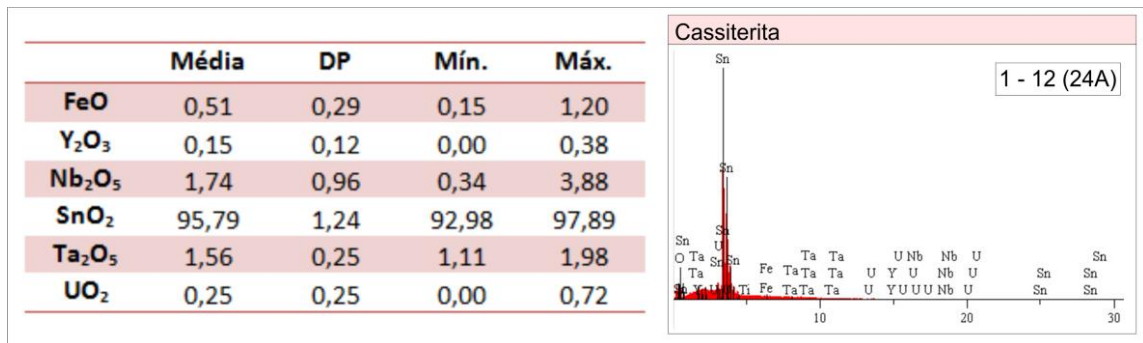
Os cristais de cassiterita não apresentaram contraste de intensidade de CL, comportando-se como fases minerais homogêneas muito escuras (figuras 24B, D e F). Foram obtidos teores para FeO: de 0,16 a 1,20%; Y₂O₅: 0,01 a 0,38%; Nb₂O₅: 0,34 a 3,88%; SnO₂: 92,98 a 97,45%; Ta₂O₅: 1,11 a 1,98% e; UO₂: 0 a 0,72% (tabela no anexo H).

Figura 24 – Aspectos morfológicos e texturais da cassiterita do GEpsH. A) cristal com bordas corroídas, ERE; B) o mesmo cristal de A, sem zoneamento; C) cristal anédrico, com inclusões de óxidos de ferro; D) o mesmo cristal de C, com zoneamento incipiente; E) cristal euédrico, com zoneamento composicional bem definido, NP; F) o mesmo cristal de E, em que um núcleo homogêneo escuro é bordejado por uma zona heterogênea com manchas cinza claras e porções escuras, sugerindo a reação da cassiterita magmática com um fluido hidrotermal.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

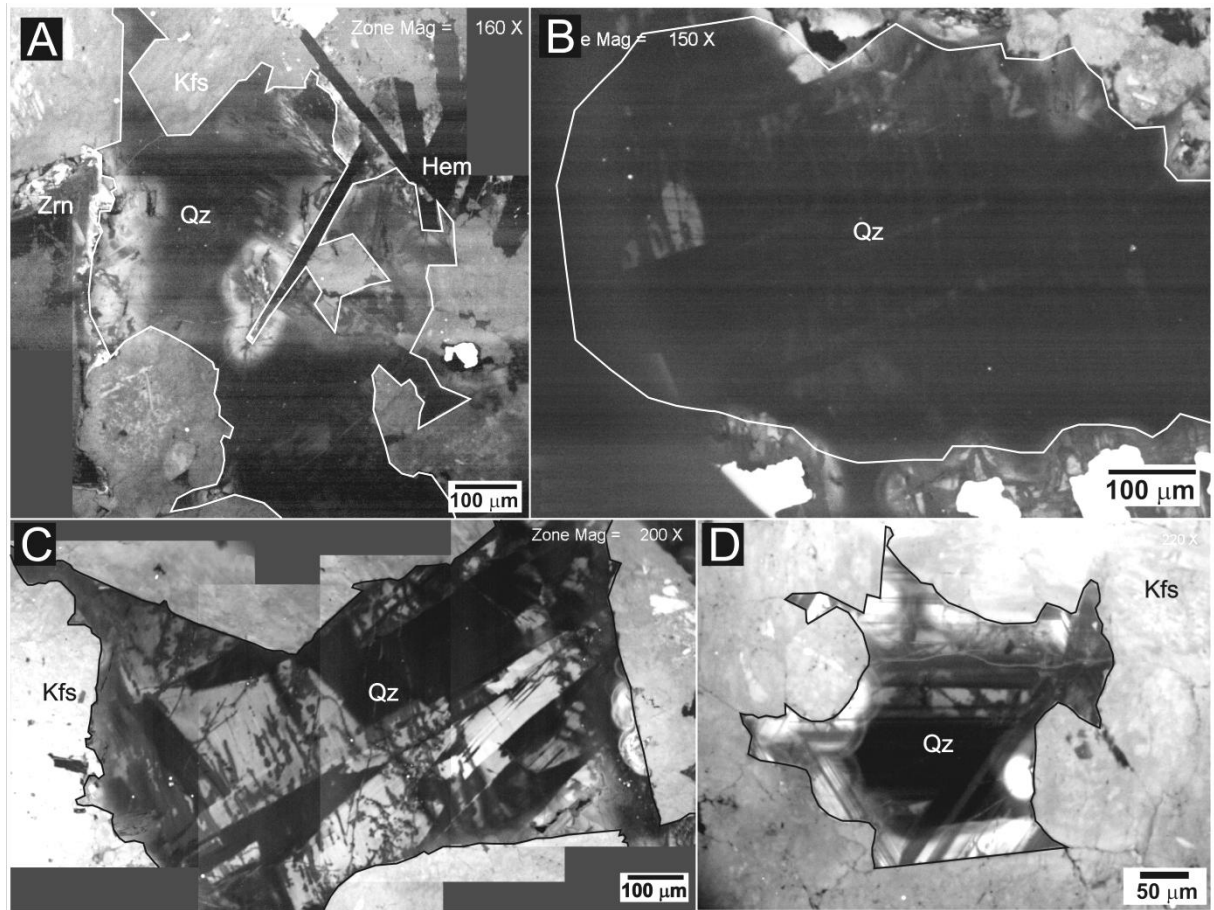
Figura 25 – Tabela indicando os teores máximo e mínimo dos principais óxidos em composição química semiquantitativa, além da média e desvio padrão (DP). Ao lado, espectro representativo das análises pontuais de 1 a 12 da figura 24A.



6.3.3 Quartzo

As análises de cristais de quartzo por CL demonstraram a existência de fases representativas do estágio magmático (figuras 26A e B) e do estágio hidrotermal de preenchimento de cavidades (figuras 26C e D). Os cristais escuros, com baixa intensidade de CL, representam as fases herdadas do estágio magmático (ABGB), enquanto que os cristais com zonação irregular (figura 26C) ou regular (figura 26D), que mostram contrastes de intensidade de CL, representam o estágio tardio do processo de epissienitização potássica.

Figura 26 – Aspectos texturais dos cristais de quartzo caracterizados no AGeEp. A-B) cristais formados no estágio magmático (ABGB), intersticiais a feldspato alcalino; C) quartzo hidrotermal preenchendo cavidade em feldspato alcalino, apresentando contrastes de intensidade de CL; D) cristal de quartzo preenchendo cavidade durante o estágio de silicificação tardia da epissienitização potássica.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

7 ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL

A caracterização petrográfica dos diferentes litotipos proporcionou a identificação dos processos de alteração hidrotermal que afetaram as rochas do plúton Madeira na zona de contato entre as fácies albita-granito e FAGHP interceptada no furo 250S/1200W. Ainda, foi possível o estabelecimento das relações temporais e espaciais entre eles. Para tanto, levou-se em consideração critérios como feições de substituição e corrosão das fases minerais, assim como seus modos de ocorrência e relações de contato. Assim, tem-se que as fases que se manifestaram nos primeiros estágios de deposição são ubíquas, as intermediárias ocorrem como fases de substituição parcial ou total (pseudomorfismo, geralmente) e as fases mais tardias depositaram como veios e vênulas de preenchimento. Abaixo são descritos os principais tipos de alteração.

7.1 EPISSIENITIZAÇÃO POTÁSSICA

Epissienitização é definida na literatura europeia como resultante da desquartzificação *subsolidus* e da modificação dos feldspatos magmáticos de rochas graníticas (BORGES et al., 2009). É comumente associada a mineralizações de U (LEROY, 1984; MARUEJOL, 1989; CUNEY et al., 2012) ou de Sn-W (CHEILLETZ e GIULIANI, 1982; CHAROY e POLLARD, 1989; COSTI et al., 2002), mas também se tem ocorrência de rochas epissienitizadas não mineralizadas (PETERSSON e ELIASSON, 1997; RECIO et al., 1997).

No início da alteração de um granito para epissienito se tem documentado o processo de lixiviação hidrotermal do quartzo, formando-se cavidades de dissolução, altamente interconectadas, conferindo à rocha, por vezes, um aspecto xenomórfico. A alteração potássica, especificamente, é caracterizada pela cristalização de feldspato potássico, principalmente como preenchimento destas cavidades (CATHELINEAU, 1983). Em termos de temporalidade, segundo Recio et al. (op.cit) o processo de formação do epissienito (remoção de quartzo e modificação do feldspato) seria pós-magmático.

A epissienitização potássica foi o principal processo de alteração hidrotermal que atingiu as rochas da área, ocorrendo de maneira generalizada e modificando

parcialmente a fácies de borda do albíta-granito (ABGB), e localmente o FAGHP. Nas rochas epissienitizadas derivadas do ABGB, se observa como principal característica a total ausência de albíta, substituída por microclínio, conforme análises de difração de raios-x (discutido adiante).

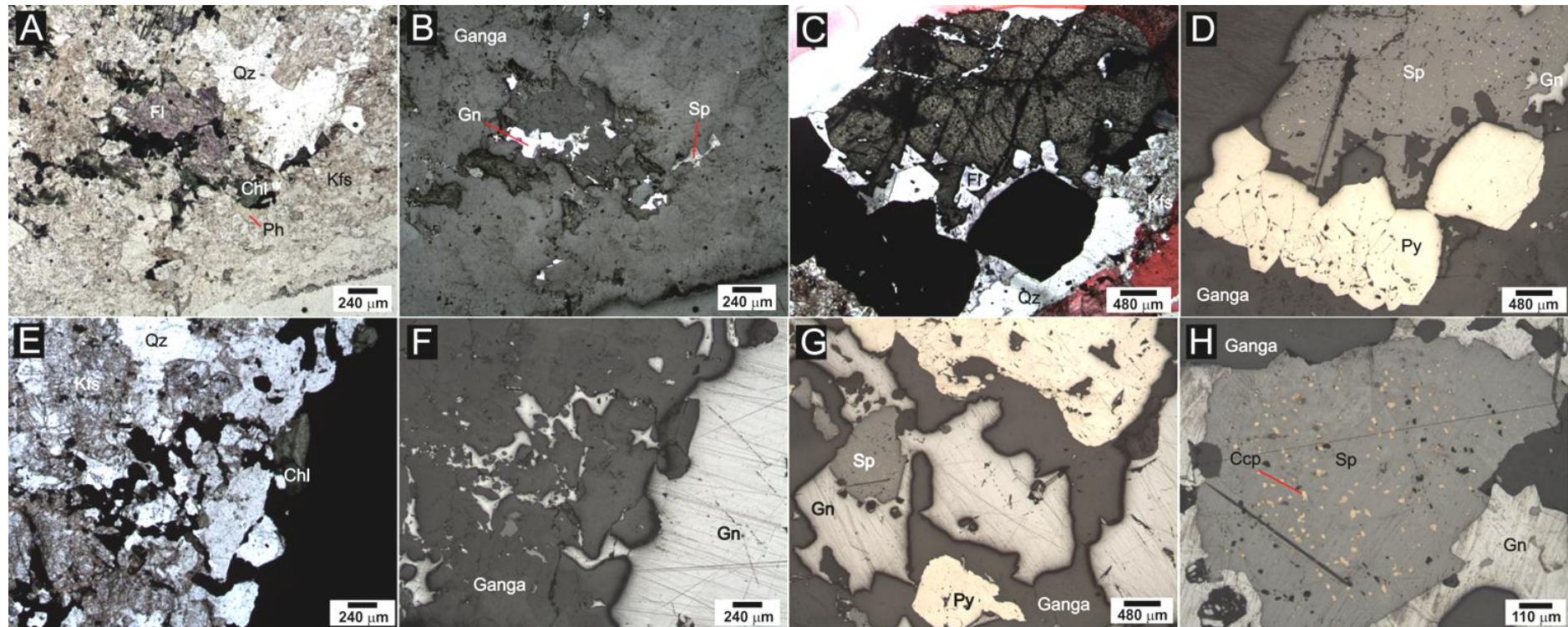
7.2 SULFETAÇÃO

A precipitação de sulfetos nos litotipos estudados parece ter ocorrido em toda a evolução hidrotermal. Porém são distinguíveis notadamente dois momentos de cristalização:

a) caracterizado pela ocorrência de finas disseminações de sulfetos nas rochas epissienitizadas, preenchendo diminutos espaços na massa rochosa. A pirita é a fase mais comum e ocorre nos epissienitos, na maioria das vezes, em associação com galena, também disseminada, sendo as relações da pirita com galena e esfalerita comumente de substituição. Estes sulfetos mais finos comumente associam-se a fluorita, fengita e clorita (figura 27A e B);

b) caracterizado pela precipitação de cristais grossos de preenchimento de cavidades de dissolução, onde se observam as maiores quantidades de sulfetos. São cristais euédricos decimétricos a centimétricos de pirita, esfalerita e galena, em associação com fluorita e quartzo (figura 27C e D). Aparentemente, a pirita corresponde à fase sulfetada mais precoce nesta associação. Outras relações são estabelecidas, como a presença de cristais de zircão inclusos nos cristais de pirita, sugerindo sua formação posterior àquela fase mineral. A galena também ocorre em cristais de aspecto vermicular, infiltrando-se por entre os cristais de feldspato alcalino adjacentes (figura 27E e F). Os cristais de esfalerita estão comumente em associação com galena (figura 27G) e apresentam diminutas gotículas de calcopirita (*blebs*), características de texturas de exsolução (figura 27H).

Figura 27 – Fotomicrografias dos sulfetos em suas formas de ocorrência mais comuns. A) disseminações de finos cristais de pirita e galena, associados à fluorita, fengita e clorita, luz natural; B) mesmo de A, em luz refletida; C) sulfetos de preenchimento de cavidades, na forma de cristais euédricos a subédricos, levemente corroídos, luz natural; D) mesmo de C, em luz refletida; E) galena de preenchimento de cavidade, com projeções vermiculares em feldspato alcalino adjacente, luz natural; F) mesmo de E, em luz refletida; G) esfalerita e galena em relação de substituição parcial, luz refletida; H) detalhe da textura de exsolução de calcopirita em cristal de esfalerita, luz refletida.



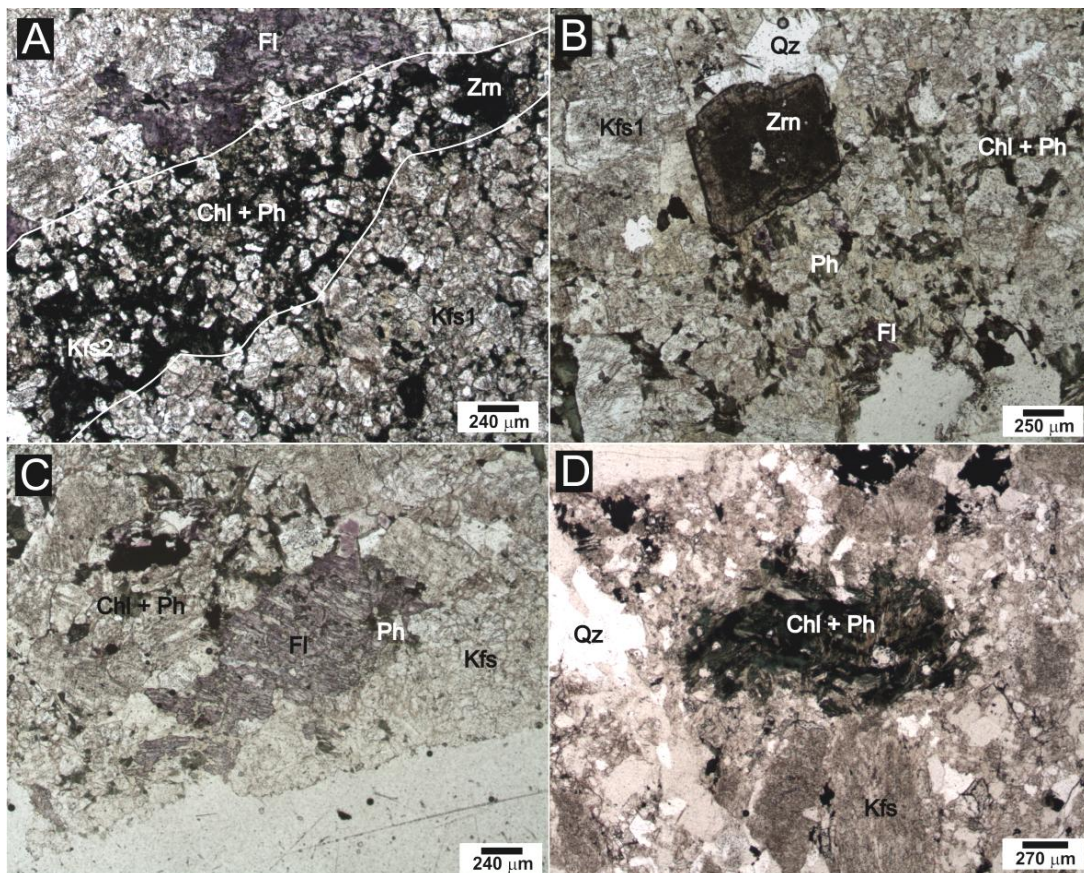
Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

7.3 GREISENIZAÇÃO

A greisenização nos litotipos estudados ocorreu em grau baixo a moderado, por vezes concentrada em zonas de fraturas (figura 28A), marcada principalmente pelas associações de quartzo, fengita e clorita, com quantidades subordinadas de fluorita e sulfetos (figura 28B). Um importante indicador do processo é a ocorrência de minerais pseudomorfos (figura 28C), além de agregados finos de quartzo, clorita, fengita e opacos. A substituição é total e mais comumente parcial (interna) de cristais como feldspato alcalino e cassiterita.

Este tipo de alteração é mais comum em porções mais rasas do furo, como observado às profundidades de 25,0, 27,0 e 28,0 m. Em níveis mais profundos (aproximadamente 43,0 m) se observam apenas núcleos de greisenização nos cristais de feldspato alcalino (figura 28D).

Figura 28 – Minerais indicadores de greisenização. A) zona de fratura rica em clorita, fengita e fluorita; B) fengita, clorita e fluorita preenchendo cavidades; C) fluorita como pseudomorfo, substituindo quase que totalmente a fengita; D) agregados de cristais interdigitados de clorita e fengita. Fotomicrografias a NP.



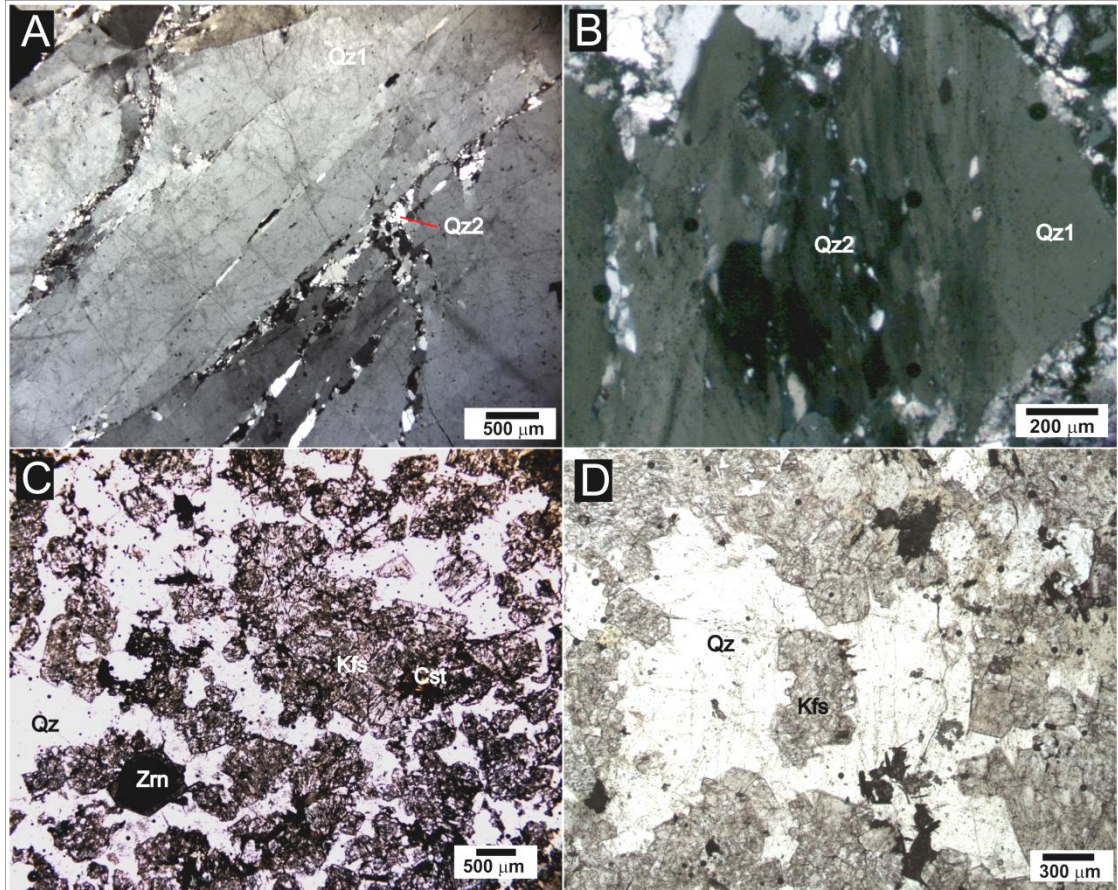
Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

7.4 SILICIFICAÇÃO TARDIA

Este tipo de alteração é comum na zona de contato do ABGB com o FAGHP. É caracterizada principalmente pela acentuada ocorrência de veios e bolsões de espessuras milimétricas a centimétricas, onde o quartzo é a única fase mineral de preenchimento (figura 29A), salvo eventual fluorita ou hematita que se depositem no contato dos veios com a rocha encaixante. Estes veios cortam a rocha e os minerais preexistentes (figura 29B).

A silicificação tardia é também manifestada pela larga ocorrência de quartzo em preenchimento de cavidades (figura 29C e D), por vezes incluso em sulfetos. Além disso, o quartzo ocorre como vênulas finas com textura em pente (*comb*).

Figura 29 – Aspectos texturais envolvendo silicificação tardia. A) bolsão de quartzo (Qz1), evidenciando a precipitação tardia de quartzo com textura em pente (Qz2) em microfraturas sobre Qz1, NC; B) quartzo primário (Qz1) cortado por uma zona com precipitação de quartzo tardio (Qz2), NC; C) abundância de quartzo preenchendo os interstícios de feldspato alcalino, NP; D) quartzo tardio e intersticial, envolvendo cristais de feldspato alcalino, NP.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

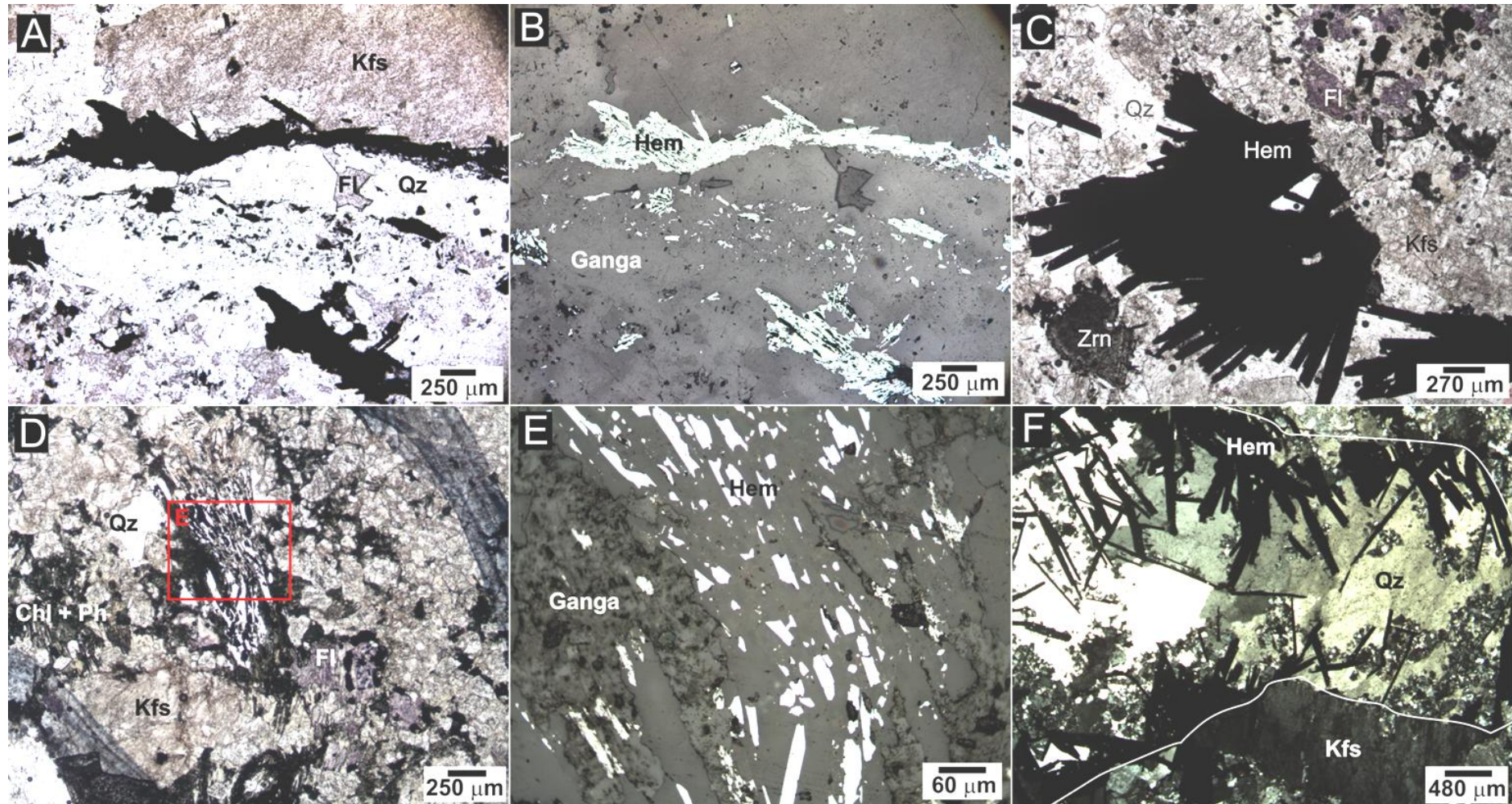
7.5 HEMATITIZAÇÃO

Impregnações e disseminações de hematita são feições comumente associadas a estágios tardios de atividade hidrotermal em sistemas mineralizados em Sn e W relacionados a greisens (PIRAJNO, 2009).

O processo de hematitização é muito expressivo na área estudada, caracterizado por intensa precipitação de hematita, principalmente nas paredes de fraturas (figura 30A e B), bem como em cavidades (figura 30C), em zonas preferenciais em associação com fengita e clorita (figura 30D e E) ou em contatos veio/rocha encaixante (figura 30F). Há também hematita na forma de cristais finos disseminados nas rochas epissienitizadas.

A fácies albita-granito de borda é caracterizada por intensa hematitização, precipitação comum de fluorita e mica amarela (COSTI, 2000; LENHARO et al., 2003). O estudo petrográfico dos litotipos do furo 250S/1200W demonstrou que a lixiviação hidrotermal de quartzo magmático associada ao estágio precoce do processo de epissienitização, e a consequente formação de cavidades de dissolução interconectadas, possibilitou a intensa percolação de fluidos ricos em F e Fe por todo o sistema, os quais favoreceram a precipitação tanto de fluorita como de hematita. A precipitação de hematita aparentemente prosseguiu até os estágios de mais baixa temperatura, durante a greisenização, quando formaram-se agregados minerais com hematita, fengita e clorita.

Figura 30 – Aspectos texturais do processo de hematitização. A) fratura preenchida por quartzo, com precipitação de hematita nas paredes; NP; B) mesmo de A, luz refletida; C) cristais tabulares radiais de hematita, preenchendo cavidade, NP; D) zona de precipitação de hematita, associada à fengita e clorita, NP; E) detalhe de D, luz refletida; F) hematita nos contatos do veio de quartzo com a rocha encaixante, NP.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

7.6 ALBITIZAÇÃO

A substituição parcial do feldspato alcalino por albita foi um processo muito incipiente nos litotipos estudados. Ele foi observado somente nas amostras do feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico, principalmente nas bordas dos fenocristais de feldspato alcalino peritítico. Muito localmente há registros de albitização no núcleo de alguns cristais, na forma de manchas difusas de albita com textura tabuleiro de xadrez. Além disso, em algumas amostras do FAGHP foram registrados finos cristais tabulares disseminados pela matriz da rocha, dispostos de maneira aleatória. Isto indica que o processo de metassomatismo sódico ocorreu de forma muito restrita na área estudada.

8 DISCUSSÕES

8.1 ALBITA-GRANITO DE BORDA EPISSIENITIZADO

O albita-granito de borda (ABGB) foi caracterizado por Costi (2000) como uma rocha de textura predominantemente porfirítica, com fenocristais de quartzo com frequente sobrecrescimento, englobados por uma matriz composta de feldspato potássico, albita, zircão, fluorita e opacos, com variável grau de impregnação por óxidos de ferro. São comuns feições de dissolução de fases primárias, formando cavidades preenchidas por quartzo secundário, albita, clorita, fluorita e opacos. Ocorrem subordinadamente cassiterita, torita e columbita, e raros xenotímio, galena, esfalerita e uraninita. O feldspato potássico tem maclamento albita-periclina difuso e pertitização pouco desenvolvida. Alguns cristais são homogêneos com zonação de borda incipiente. O quartzo é subédrico a anédrico, com poucas inclusões de albita, e o quartzo com textura em pente é muito comum, preenchendo microfraturas. A albita tem forma de ripas, sendo alguns cristais reabsorvidos pelo sobrecrescimento de quartzo. O zircão é anédrico a subédrico, com aspecto túrbido por impregnação e pelas inclusões de minerais como torita, opacos, micas e fluorita. Tem bordos embaiados devido ao desequilíbrio com o feldspato potássico. A cassiterita ocorre disseminada e tem tonalidade fortemente avermelhada, preenchendo cavidades. A torita é comum próxima às zonas de greisens.

O grupo de rochas do furo 250S/1200W definido como albita-granito de borda epissienitizado apresenta aspectos texturais e mineralógicos remanescentes do ABGB descrito por Costi (2000). No entanto, há diferenças substanciais em relação ao ABGB que são indicativas da atuação de processos de epissienitização. Os teores reduzidos de quartzo e a maior quantidade de cavidades indicam a dissolução considerável do quartzo primário, característico do estágio inicial da epissienitização. Outro aspecto importante é a ausência total de albita observada neste litotipo, dissolvida no processo de lixiviação das fases minerais, e substituída por microclínio, quartzo tardio ou agregados de clorita, fengita, hematita e sulfetos (pirita, galena, esfalerita e calcopirita).

Nas amostras estudadas, não há registros de pseudomorfismo de microclínio sobre a albita do ABGB, uma vez que seus cristais ripiformes foram completamente

substituídos por massas de cristais euédricos de microclínio que praticamente ocupam os espaços intersticiais entre os cristais remanescentes de quartzo e feldspato potássico do ABGB. As evidências texturais indicam que o metassomatismo potássico foi o processo hidrotermal mais importante nesta porção do plúton Madeira, em que também ocorreu uma forte interação entre os líquidos que originaram as suas fácies mais tardias.

8.2 GRANITO EPISSIENITIZADO HÍBRIDO

Este grupo de rochas tem características peculiares, pois na análise petrográfica podem ser observados aspectos típicos dos dois outros grupos de rochas: FAGHP e AGbEp. A característica mais marcante do FAGHP são os fenocristais euédricos de granulometria média a grossa de feldspato potássico e quartzo. Esta rocha não apresenta mineralização, sendo por vezes levemente greisenizado. O AGbEp tem textura geralmente mais equigranular e é composto principalmente de quartzo e feldspato alcalino, com ocorrência acessória de cassiterita, opacos, zircão, esfalerita e torita.

De acordo com Costi (2000), o granito *hipersolvus* e o albita-granito tiveram interação e foram colocados na crosta simultaneamente, sendo então comagmáticos. Dadas as circunstâncias de locação do furo nesta zona de contato entre as duas subfácies, pode-se esperar rochas resultantes desta interação.

As características petrográficas no contato, documentadas por Costi (op.cit), remetem a modificações significativas do granito *hipersolvus*, com zonas onde se observa o predomínio do arranjo textural do albita-granito e zonas de textura equigranular com feldspato albitizado, similares ao granito *hipersolvus*. Há também interação mais intensa, onde não se observa a ocorrência de contatos bruscos. O granito epissienitizado híbrido corresponderia a estas porções, nas quais a rocha é decorrente de uma mistura textural e mineralógica entre as duas subfácies.

É registrada na zona de contato (COSTI; BORGES; DALL'AGNOL, 2005) a ocorrência de porções bem delimitadas do albita-granito inseridas no domínio do granito *hipersolvus*. Isto sugere que enquanto magmas houve uma leve mistura de natureza mecânica entre ambos (*mingling?*).

Dentro deste grupo pode-se observar uma leve variação das características morfológicas e texturais, sendo ora mais similares ao FAGHP, com maiores

quantidades de fenocristais de feldspato potássico perítico, ora mais similares ao ABGB, com texturas mais equigranulares e maiores conteúdos de quartzo e zircão metamítico, além de maiores teores de cassiterita e hematita.

8.3 ESTÁGIOS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL

Alteração hidrotermal é definida como um processo metassomático que imprime modificações mineralógicas, químicas e texturais, resultantes da interação de fluidos aquosos quentes (~ 50° a > 500°C) com as rochas pelas quais eles percolam, sendo esta interação devida ao estado de desequilíbrio químico entre fluido e rocha. Os fluidos atacam quimicamente os constituintes minerais da rocha, a qual tende ao reequilíbrio através da formação de novas assembleias minerais que sejam estáveis sob as novas condições. A alteração pode ocorrer principalmente sob condições *subsolidus* pela infiltração e ação de fluidos supercríticos.

O comportamento dos fluidos varia de acordo com a pressão confinante. Em maiores profundidades, os fluidos percolam mais lentamente, enquanto que em níveis crustais mais rasos têm maiores velocidades, em decorrência da grande quantidade de espaços abertos por componentes tectônicos (falhas, fraturas) e poros interconectados.

Alguns dos fatores que controlam a alteração hidrotermal, determinando seu tipo e abrangência, são: a) a natureza da rocha; b) a composição do fluido; c) a composição, atividade e potencial químico dos componentes do fluido, como H⁺, CO₂, O₂, K⁺, H₂S e SO₂; c) grau de permeabilidade da rocha; d) a razão entre o volume do fluido e da rocha e e) condições de pressão e temperatura. Outro fator importante é o controle estrutural da região, que determina o estilo da mineralização.

A alteração e a mineralização são tratados como processos interligados e interdependentes, dado que a alteração geralmente vem acompanhada da mineralização, precipitada a partir de fluidos carregados de solutos. Os tipos de alteração comuns em sistemas mineralizados em Sn-W e granitos tipo-S são albitização e/ou microclinização, alteração fílica e greisens, além de subordinada ocorrência de veios, deposição de metais e alteração argílica, podendo esta última estar ausente. Na Amazônia, os principais depósitos estaníferos estão associados a granitos tipo-A, em que a mineralização é hospedada por rochas ricas em albita (magmática ou hidrotermal) e greisens.

Os principais tipos de alteração hidrotermal associada a rochas granitoides, levando em consideração a forma e o caráter do fenômeno, são o metassomatismo alcalino (sódico e potássico), alteração sericítica, greisenização, alteração argílica, argílica avançada e propilitização. As reações destas podem se desenvolver por hidrólise, troca iônica, hidratação/desidratação, oxirredução, entre outras.

A caracterização petrográfica realizada neste estudo permitiu estabelecer a sequência temporal dos principais tipos de alteração identificados.

8.3.1 Desquartzificação

Caracterizada pela dissolução do quartzo magmático principalmente do albita-granito de borda. Este processo propiciou um grande aumento na permeabilidade do ambiente pelo qual os fluidos hidrotermais de alta temperatura percolaram, gerando cada vez mais espaço nas rochas, em um processo de retroalimentação. É o processo mais precoce, provavelmente tendo ocorrido sob temperaturas superiores a 400°C.

8.3.2 Alteração potássica

A alteração potássica é aqui caracterizada dentro do processo de epissienitização que afetou regionalmente a área. Em termos temporais, ocorreu após o estágio de desquartzificação *subsólido* (lixiviação hidrotermal do quartzo), sendo associada à modificação dos feldspatos primários. Dois fatores podem ter influenciado o desencadeamento do processo: a) o aumento da fO_2 no sistema e; b) a natureza das rochas, pois são constituídas essencialmente de feldspato alcalino e quartzo, com predominância do primeiro.

Notadamente se observa a substituição parcial do feldspato alcalino primário por filossilicatos, como sericita, clorita e subordinada fengita. Essa substituição pode ser nucleada ou ocorrer nas bordas dos minerais. Nas rochas estudadas, este processo foi pouco pronunciado.

O processo de alteração potássica foi mais intenso em função da grande quantidade de cavidades formadas e o preenchimento delas a partir da cristalização de microclínio, que é o principal mineral de alteração. A albita do ABGB foi totalmente substituída por microclínio hidrotermal de alta temperatura, mas não foi

registrada textura de pseudomorfismo. O fluido envolvido no metassomatismo potássico deve ter sido alcalino e subsaturado em sílica para ter induzido a desquartzificação anterior, mas o grau de alcalinidade não deveria ter sido alto, uma vez que fluidos oxidados (como aqueles que devem ter circulado nesta área), altamente alcalinos, tenderiam a estabilizar a albita, o que implicaria em metassomatismo sódico (CUNEY et al., 2012). Um fluido com tais características poderia ter se separado do líquido magmático gerador do FAGHP, em determinado momento de sua evolução.

Partindo-se da hipótese de que a colocação contemporânea dos dois líquidos (ABG e FAGHP) na crosta (COSTI, 2000) é favorecida por evidências de campo e petrográficas, torna-se plausível considerar que um processo de imiscibilidade líquido-fluido (despressurização?) possa ter gerado um fluido enriquecido em K, a partir do FAGHP, tendo em vista que uma grande quantidade de Na foi consumida na cristalização de albita na fácies ABGN. Uma hipótese alternativa seria considerar que a epissienitização está também vinculada geneticamente aos fluidos que causaram as reações de autometassomatismo da fácies albita-granito de núcleo (responsável pela diferenciação da subfácies de borda).

8.3.3 Greisenização

O processo de metassomatismo alcalino é responsável pela liberação de íons H^+ , resultando no decréscimo da razão álcalis/ H^+ e subsequente desestabilização dos feldspatos e micas, com crescimento de novas fases minerais, nos estágios de greisenização (PIRAJNO, 2009).

Apesar de sua ocorrência mais restrita, a greisenização foi registrada nos litotipos estudados, através de associações minerais à base de filossilicatos, como fengita, clorita e sericita, além de quartzo, fluorita e hematita, mais localmente. Tal processo ocorreu em um estágio hidrotermal de alta fugacidade de oxigênio, com fluidos ácidos relativamente enriquecidos em flúor.

8.3.4 Silicificação tardia

Este estágio de alteração é caracterizado pelo preenchimento de cavidades por quartzo tardio, principalmente de caráter intersticial, a partir de um fluido saturado em sílica. Este processo afetou invariavelmente todos os litotipos, seja através do preenchimento de cavidades abertas, seja através do preenchimento de fraturas das mais diversas espessuras, nos episódios de maior deformação dútil do sistema. Nos estágios mais tardios deposita-se quartzo finamente granuloso, com textura em pente (*comb*), em microfraturas.

8.4 MINERALIZAÇÃO

A fase mineral que constitui os depósitos estaníferos no Distrito Mineiro Pitinga é a cassiterita. No albita-granito a mineralização é de origem magmática, enquanto que a cassiterita dos depósitos associados ao plúton Água Boa é de natureza hidrotermal (COSTI, 2000; BORGES, 2002).

Segundo COSTI (2000) não há mineralização estanífera no FAGHP. No entanto, no presente estudo, foi detectada a presença de cassiterita associada à hematita e quartzo preenchendo uma fratura tardia que corta o FAGHP à profundidade de aproximadamente 24 metros. Esta ocorrência demonstra que houve precipitação de cassiterita relacionada à atividade hidrotermal proveniente de fluidos extremamente oxidados e de baixa temperatura, que percolaram a zona de contato entre o ABGB e o FAGHP.

Um dos principais objetivos do presente estudo foi investigar a possível origem hidrotermal da cassiterita encontrada nas rochas epissienitizadas nesta área do plúton Madeira. Uma das abordagens utilizadas foi a análise das texturas apresentadas pelos cristais de cassiterita em imagens de catodoluminescência. Com base no imageamento realizado, efetuaram-se análises semiquantitativas por EDS nos referidos cristais. Para fins comparativos, também foram realizadas análises químicas semiquantitativas e imagens por CL em cristais de cassiterita do albita-granito de núcleo.

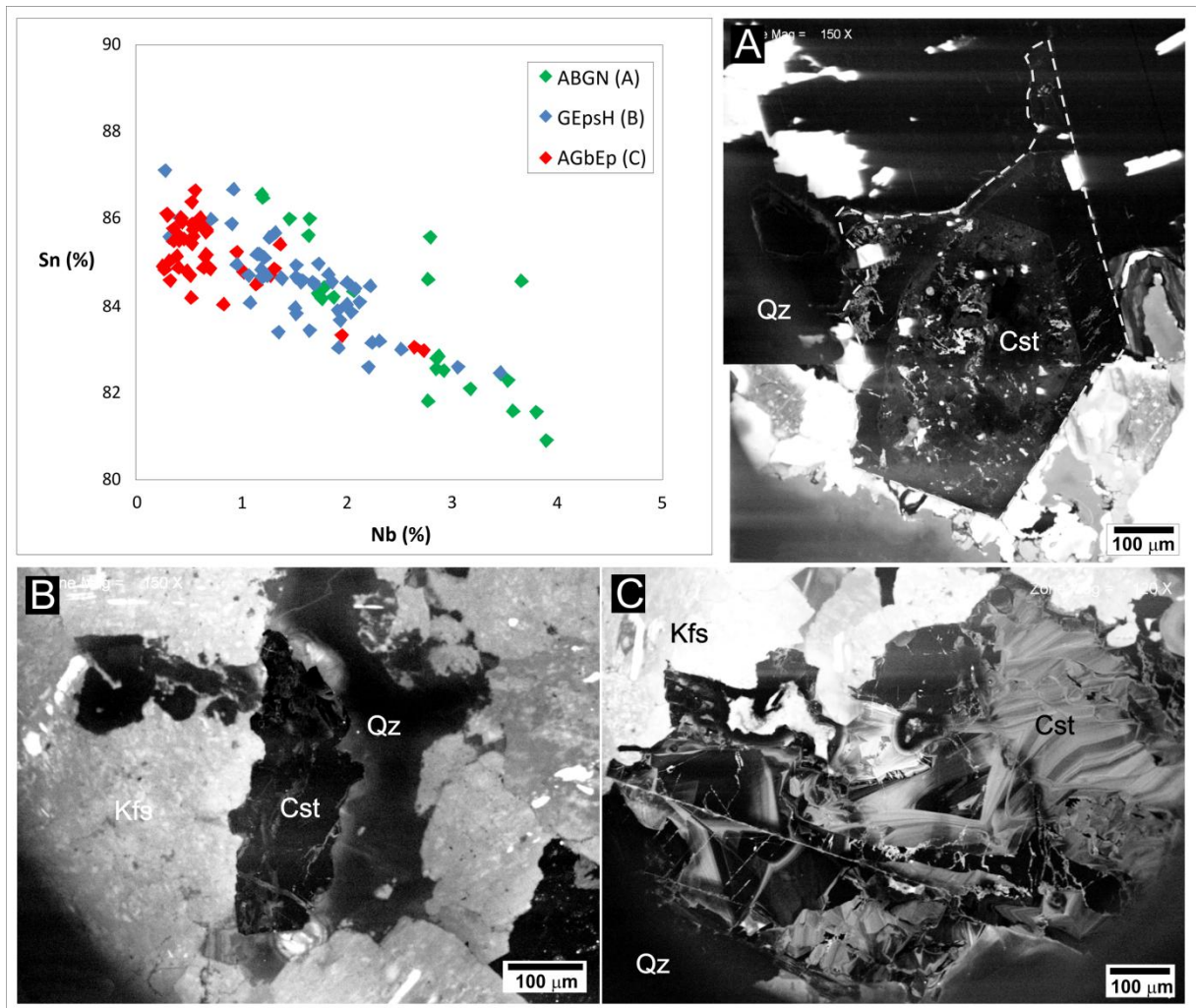
A avaliação da distribuição das análises químicas no diagrama Sn x Nb (figura 31) demonstra que, apesar do espalhamento, há três grupos composicionais que se distinguem pela ocupação do Nb na estrutura da cassiterita.

No AGbEp as cassiteritas são mais puras, uma vez que seus conteúdos de Nb são baixos, entre 0,5 e 1,2%. Seus cristais apresentam um padrão zonado irregular em CL, ressaltado por contrastes entre zonas cinza claras e cinza escuras. No GEpsH, os conteúdos de Nb concentram-se, principalmente, entre 1 e 2%, mas algumas análises caem no campo das cassiteritas mais puras e poucas no campo daquelas mais ricas em Nb. Em CL, seus cristais mostram-se escuros e com algumas porções com intensidade sutilmente mais clara. A cassiterita magmática do ABGN apresenta-se invariavelmente muito escura, sem qualquer contraste de intensidade de CL, mas comumente apresenta zonas irregulares mais claras, associadas a texturas de corrosão. Composicionalmente é mais rica em Nb do que aquela dos dois litotipos identificados neste estudo (figura 31).

Tomando-se como referência as características texturais e composicionais da cassiterita magmática do ABGN, é possível deduzir que os cristais com razoáveis contrastes de intensidade de catodoluminescência e teores de Nb muito baixos foram depositados por fluidos hidrotermais, provavelmente mais tardios, geneticamente associados ao processo de epissienitização potássica.

Analisando-se o *trend* de variação composicional no diagrama, observa-se que a cassiterita composicionalmente mais pura é aquela depositada no albita-granito de borda epissienitizado. Os cristais das amostras do granito epissienitizado híbrido apresentam assinatura tanto magmática quanto hidrotermal, em função do seu grande espalhamento no diagrama Sn x Nb. Além disso, a cassiterita do albita-granito de núcleo (amostra ABGN-210) também aparenta ter sido submetida a novas condições (corrosão *subsólido*?), modificando parcialmente sua composição química, conforme sugerido pelas texturas de CL.

Figura 31 – Distribuição das análises químicas (EDS) de cassiterita no diagrama Sn x Nb. O *trend* de variação composicional demonstra que os cristais do AGbEp são relativamente mais puros, enquanto que a cassiterita do ABGN apresenta os maiores teores de Nb. Os cristais do GEpsH mostram a maior variação composicional, indicando que este litotipo contém cassiterita tanto de origem magmática quanto hidrotermal. A) cassiterita magmática do ABGN, CL; B) cristal anédrico do GEpsH, CL; C) cassiterita do AGbEp, CL.



Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

8.5 VARIAÇÕES COMPOSICIONAIS DE ZIRCÃO

É conhecida a elevada estabilidade química do zircão, que teoricamente se mantém preservado quando submetido a condições *subsolidus*. Esta característica, associada à presença de determinados elementos-traço em sua estrutura, tais como Hf, Y, Nb, Th e U, possibilitou o avanço dos estudos relacionados à evolução petrogenética e especialização metalogenética de rochas graníticas (WANG et al., 2000; KEMPE et al., 2004; LAMARÃO et al., 2007).

Assim, zircões de rochas graníticas com teores elevados de Hf caracterizam granitos evoluídos e enriquecidos em Sn, Mo, W e Ta (KEMPE et al., 1997; WANG et al., 2000). Em granitos com topázio e metais raros, as razões Zr/Hf muito baixas obtidas em cristais de zircão foram interpretadas como a assinatura primária de líquidos graníticos extremamente evoluídos ou, então, imposta por processos de albitização resultante da ação de fluidos ricos em F (KEMPE et al., 2004).

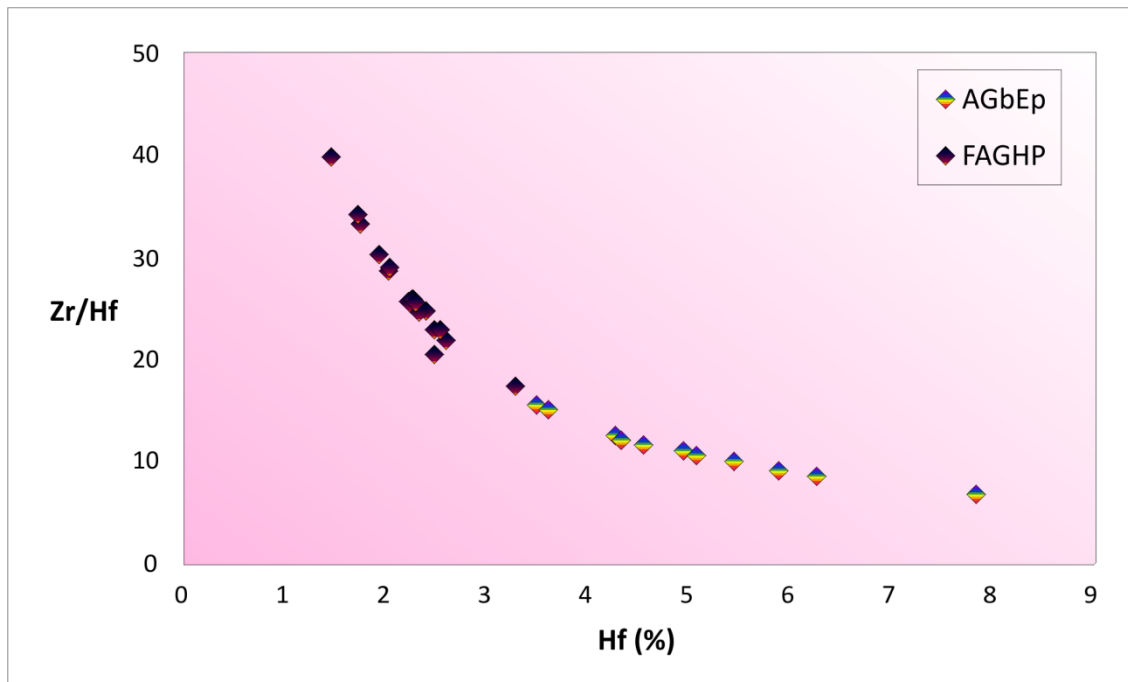
Basicamente dois tipos de zircão foram identificados nos litotipos caracterizados no presente trabalho. O primeiro ocorre no FAGHP, incluso nos fenocristais de quartzo e, por vezes, no GEpsH. Seus cristais têm terminações euédricas e granulação fina a muito fina, inclusões raras ou ausentes e altos contrastes de intensidade de catodoluminescência que ressaltam suas zonas de crescimento. As análises químicas por EDS indicam um leve enriquecimento nos conteúdos de Hf do centro para as bordas.

O segundo tipo ocorre nas rochas epissienitizadas (GEpsH e AGbEp). Seus cristais apresentam terminações subédricas a anédricas e granulação média a grossa, e invariavelmente encontram-se muito oxidados e com aspecto turvo. O núcleo destes cristais mostra-se metamitizado e com quantidade variável de inclusões de columbita, hematita e fluorita. Suas bordas são fortemente corroídas e reabsorvidas nos contatos com feldspato alcalino, quartzo tardio e fluorita. Os contrastes de intensidade de catodoluminescência são menos pronunciados do que nos cristais do FAGHP, mas as texturas ilustram claramente a formação de bordas com zoneamento regular em torno de núcleos mais escuros metamitizados.

Na realidade, os zircões das rochas epissienitizadas são fases herdadas do albita-granito, com diferentes graus de recristalização. Normalmente, suas bordas são mais enriquecidas em Hf e, conseqüentemente, apresentam razões Zr/Hf variando de 15,62 a 6,84 (figura 32) no sentido núcleo-borda (AGbEp).

Por sua vez, os zircões do FAGHP apresentam razões Zr/Hf variando entre 40,0 e 17,52 (figura 32), com valores decrescentes em direção às zonas de borda dos cristais.

Figura 32 – Distribuição das análises químicas (por EDS) de zircão no diagrama Zr/Hf versus Hf. Os zircões do AGbEp, representando as rochas epissienitizadas, são relativamente mais enriquecidos em Hf do que os zircões do FAGHP.

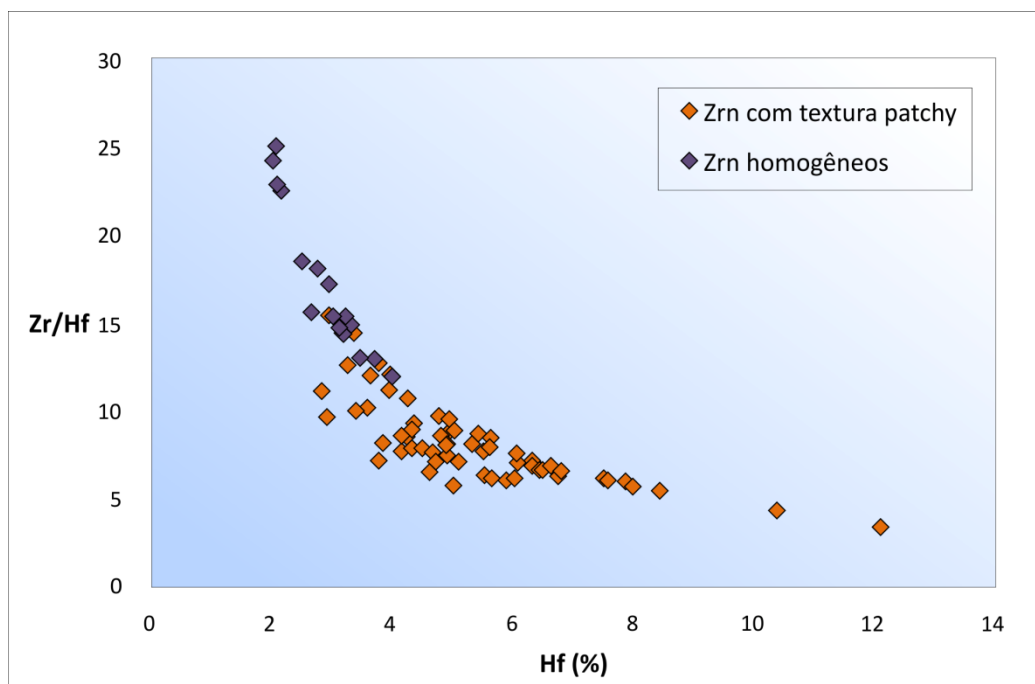


O granito epissienitizado híbrido apresenta, localmente, os dois tipos de zircão, reforçando a hipótese de mistura de magmas para a sua origem. Os zircões enriquecidos em Hf deste litotipo apresentam, por vezes, inclusões de finas lamelas de hematita, dispostas paralelamente às faces do cristal. Isto é indicativo, em função da precipitação tardia da hematita, que este zircão (ou as zonas de crescimento subsequentes) formou-se tardiamente na sequência de cristalização magmática, conforme descrito por Costi (2000). As inúmeras inclusões presentes no núcleo destes zircões (columbita, hematita, quartzo e fluorita) também são indicativas desta cristalização tardia.

O comportamento apresentado pelos zircões no diagrama da figura 32 é similar ao *trend* de variação composicional mostrado por zircões do topázio-albita-granito (TAbG), fácies mais evoluída do plúton Água Boa (BORGES et al., 2011). Os zircões homogêneos (figura 33) apresentam uma variação composicional semelhante aos zircões do FAGHP, com um leve enriquecimento em Hf. Por sua vez, zircões com textura *patchy*, com manchas irregulares enriquecidas em Hf, e formados nos estágios finais da cristalização do TAbG, apresentam uma distribuição similar àquela dos zircões do AGbEp.

Da mesma forma que a variação composicional (e as razões Zr/Hf) dos zircões do topázio-albita-granito foi considerada como decorrente da sua evolução magmática, considera-se, nesse estudo, que a distribuição dos zircões do AGbEp na figura 32 reflete a sua composição química original e que, portanto, os fluidos hidrotermais envolvidos na epissienitização potássica não modificaram a sua assinatura magmática.

Figura 33 – *Trends* de variação composicional de zircões do topázio-albita-granito, considerada a fácies mais evoluída do plúton Água Boa.



Modificado de Borges et al. (2011). Símbolo mineral conforme Whitney e Evans (2010)

8.6 FELDSPATO ALCALINO

Dentre as principais discussões abordadas nesse trabalho, destaca-se a questão relativa à origem e cronologia das várias gerações de feldspato alcalino presentes nos litotipos epissienitizados. Estas rochas (à exceção do albita-granito de borda epissienitizado, sem fenocristais) apresentam, pelo menos, duas populações de feldspato alcalino: uma na forma de fenocristais euédricos a subédricos, com pertitas irregulares e maclamento Carlsbad, e outra de granulação fina, constituinte da matriz, predominantemente na forma de cristais euédricos curtos e muito turvos,

fortemente impregnados por hematita. Especificamente no caso do FAGHP, a origem do feldspato alcalino que compõe a matriz mais fina não suscita dúvidas e, por isso, não foi considerada na discussão abaixo.

Os fenocristais de feldspato alcalino peritéticos são interpretados como magmáticos. A segunda população, no entanto, apresenta evidências texturais sugestivas de uma origem hidrotermal. A principal evidência reside nas relações de contato com outros minerais, tal como ocorre com cristais de zircão metamitizados, corroídos pelos fluidos a partir dos quais se originaram o feldspato alcalino e a fluorita. Além disso, menos comumente, estes cristais finos preenchem cavidades, em associação geralmente com sulfetos e quartzo.

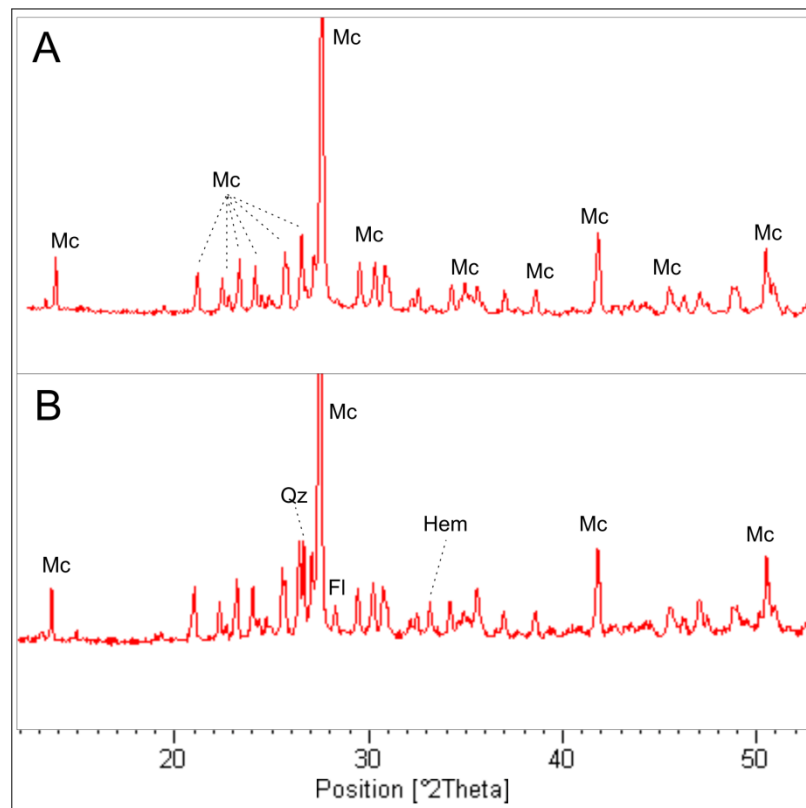
Para a caracterização e identificação desta fase tardia, e para testar a hipótese inicial da presença de adularia na paragênese hidrotermal, foram realizadas análises por difração de raios-X, com base na separação seletiva de cristais das duas populações de feldspato de uma rocha epissienitizada porfirítica.

Na fração correspondente aos fenocristais, o feldspato alcalino foi identificado como microclínio (figura 34A).

Na fração da matriz (figura 34B) o microclínio foi identificado com picos bem definidos. O pico em 3,34 Å indica a presença de quartzo, e com picos pouco expressivos ocorrem hematita e fluorita. Estas fases estão presentes devido à dificuldade de separação da fração feldspática mais fina dos outros minerais que compõem a matriz.

Sendo assim, os dados obtidos descartam, *a priori*, a presença de adularia na população de feldspato potássico mais fino. Segundo Deer, Howie e Zussman (1992), o microclínio é uma fase mineral extremamente comum, podendo cristalizar tanto em condições magmáticas, quanto nos estágios pneumatolíticos e hidrotermais de alta temperatura em sistemas graníticos. Desta forma, a precipitação do microclínio nestas rochas sugere que o estágio de alteração potássica ocorreu sob temperaturas do intervalo pneumatolítico-hidrotermal (300-500°C), após o estágio de desquartzificação que caracteriza o início do processo de epissienitização.

Figura 34 – Difratomogramas comparados de amostras contendo fenocristais de feldspato alcalino (A) e feldspatos da matriz (B), representativos de rochas epissienitizadas. O feldspato identificado é o microclínio, e as demais fases identificadas em B são quartzo, hematita e fluorita.



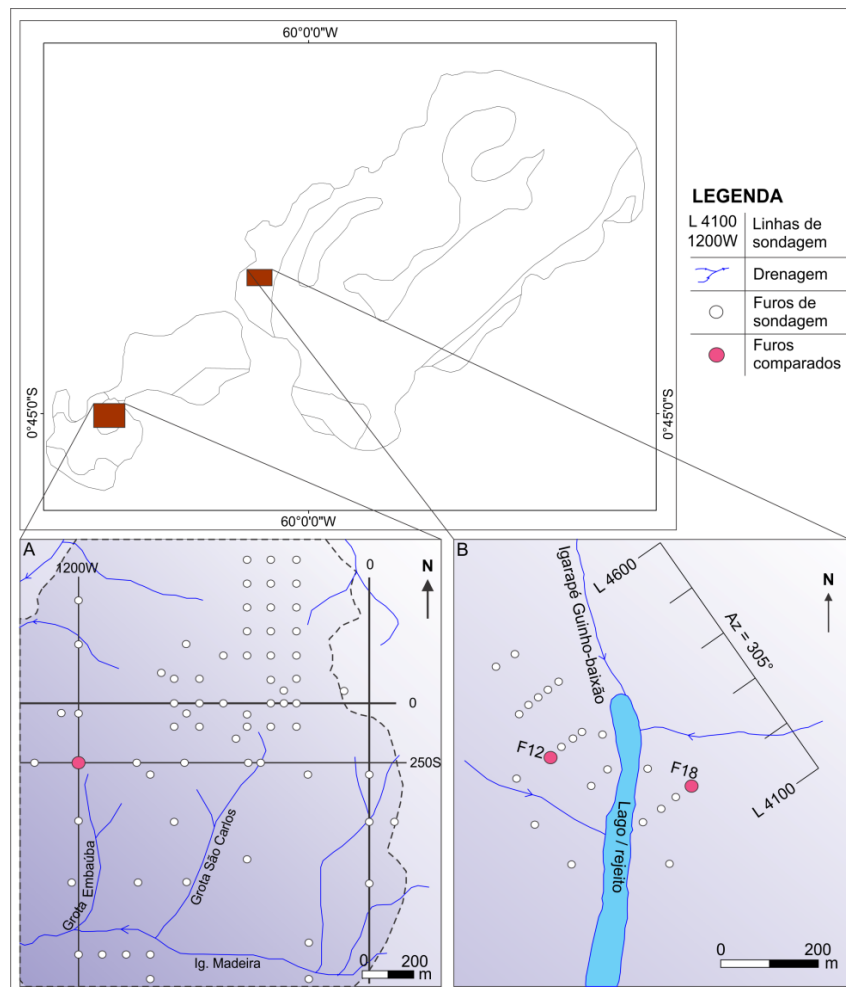
Siglas minerais conforme Whitney e Evans (2010).

9 ESTUDOS COMPARATIVOS

9.1 INTRODUÇÃO

A partir dos dados obtidos no presente trabalho, comparou-se o perfil geológico do furo 250S/1200W com os de dois furos de sondagem realizados na área mineralizada Guinho-Baixão, na borda oeste do plúton Água Boa (furos F12-GB e F18-GB) (figura 35). Estes dois últimos também interceptaram lentes de epissienitos potássicos e, particularmente no caso do furo F18-GB, estas rochas estão mineralizadas em Sn, em uma zona fortemente cloritizada.

Figura 35 – Mapa esquemático de localização dos furos de sondagem discutidos no estudo comparativo. A) albita-granito do plúton Madeira; B) área mineralizada Guinho-Baixão do plúton Água Boa.



Fonte: A) modificado de Costi (2000); B) Borges (1997).

9.2 CORRELAÇÃO COM O FURO F12-GB

Os greisens e epissienitos potássicos do furo F12-GB foram caracterizados por Borges (2002), com base em estudos petrográfico, mineralógico, geoquímico e metalogenético. Este furo interceptou uma zona fortemente greisenizada, formada pela intercalação de epissienitos potássicos greisenizados e greisens. Esta zona greisenizada ocorre intercalada a uma associação de granitos tipo-A, da série rapakivi, de granulação média a grossa e textura equigranular gradando para porfírica (figura 36).

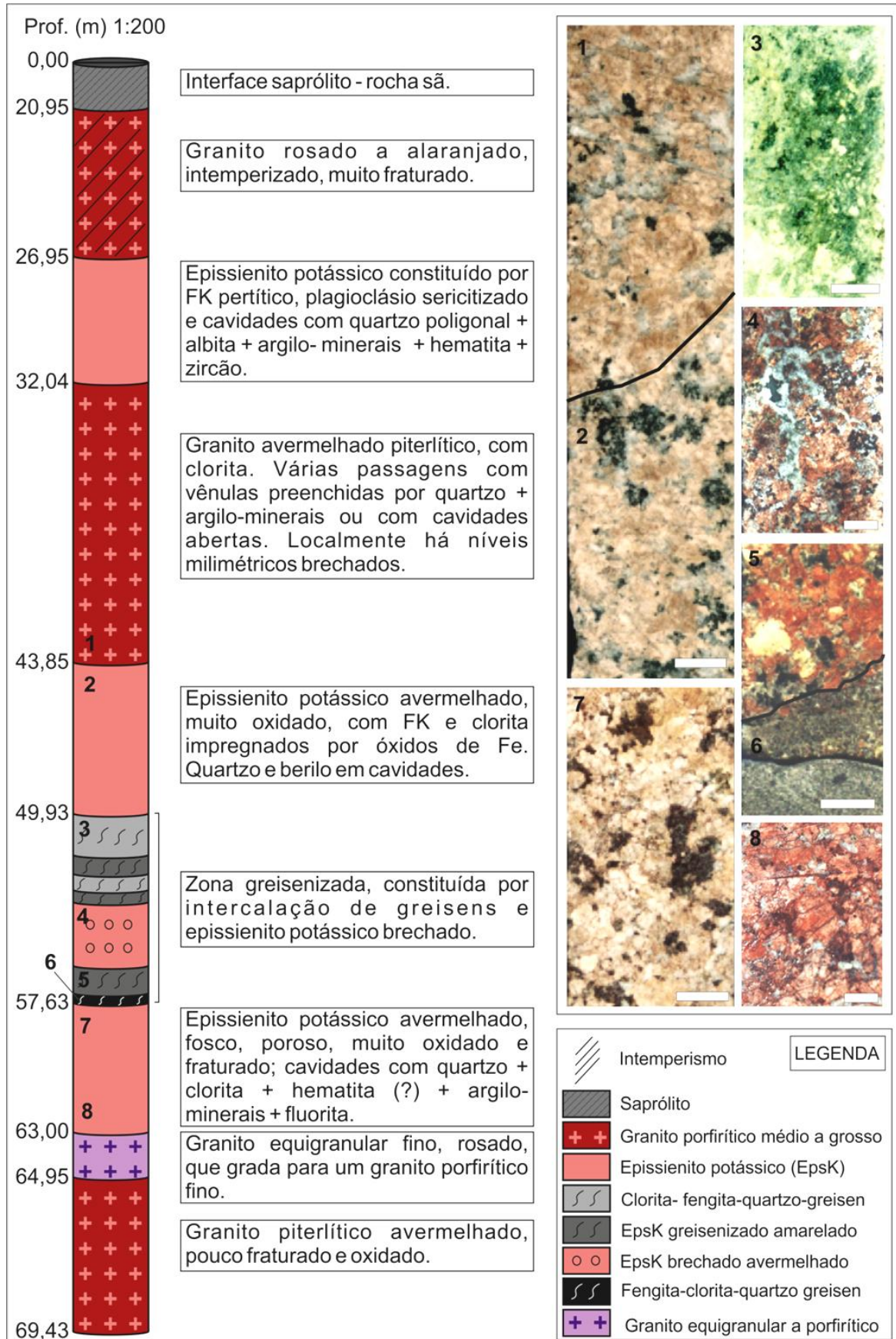
Um breve resumo dos litotipos segue abaixo:

a) Biotita-feldspato alcalino-granito – rocha avermelhada, com textura piterlítica, rica em clorita, que forma agregados com zircão, opacos, hematita, fluorita e quartzo, além de substituir o feldspato alcalino, preenchendo fraturas. Os feldspatos alcalinos são impregnados por hematita e por vezes substituídos por argilominerais. As fraturas, em geral, estão preenchidas por quartzo, fluorita, albita, sericita e, localmente, esfalerita e zircão.

b) Epissienitos potássicos – rochas avermelhadas, fortemente fraturadas e oxidadas, caracterizadas pela grande quantidade de cavidades de dissolução vazias ou preenchidas por quartzo poligonizado, fluorita, berilo, albita, clorita, sericita, sulfetos e argilominerais. Estas cavidades geralmente são interligadas por coalescência ou por finas fraturas. Por vezes apresenta greisenização parcial, evidenciada pela substituição dos feldspatos por agregados de quartzo, siderofilita, fengita e clorita.

c) Greisens – rochas com textura granular média xenomórfica, constituídas essencialmente por quartzo, fengita e clorita, e quantidades menores de cassiterita, pirita, galena, esfalerita, zircão, rutilo, berilo e fluorita. São relativamente pobres em quartzo (< 50%) e ricas em filossilicatos. Os greisens mais ricos em clorita apresentam os maiores volumes de cassiterita e sulfetos. A cassiterita ocorre na forma de cristais anédricos a subédricos, ora associados à fengita e quartzo, ora a clorita, quartzo e pirita.

Figura 36 – Perfil esquemático do furo F12-GB. A escala nas imagens equivale a 1 cm.



Fonte: Modificado de Borges (2002).

Embora muito pouco dos litotipos originais tenha se preservado no âmbito do furo de sondagem, o biotita-feldspato alcalino-granito ainda é reconhecido. Os demais litotipos inserem-se na classificação de epissienitos potássicos e greisens, em função de suas características texturais e mineralógicas.

Enquanto os epissienitos potássicos e greisens do furo F12-GB têm como protólito o biotita-álcali feldspato-granito, as rochas epissieníticas do furo 250S/1200W estão encaixadas em uma zona de interação entre o feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico e o albita-granito de borda. Os epissienitos potássicos são as rochas encaixantes imediatas dos greisens ricos em filossilicatos do furo F12-GB, enquanto que os epissienitos do furo 250S/1200W apresentam-se apenas levemente greisenizados.

No furo F12-GB não foram detectadas rochas com características texturais e mineralógicas híbridas, como no furo 250S/1200W. Costi (2000) também documentou a formação de rochas com características texturais e mineralógicas mistas nos contatos entre o albita-granito de núcleo e o granito *hipersolvus* em altas profundidades. Segundo o citado autor, estas rochas se formaram pela atuação de processos como albitização e epissienitização.

Os epissienitos potássicos do furo F12-GB são compostos de feldspato alcalino pertítico, plagioclásio sericitizado, clorita e cavidades preenchidas por quartzo poligonal, albita, clorita, sericita, hematita, fluorita, argilominerais e berilo. Diferentemente, os epissienitos potássicos aqui caracterizados são compostos de feldspato potássico homogêneo, com “manchas” de aspecto turvo, provavelmente de hematita.

Na porção central da zona greisenizada do furo F12-GB, o epissienito adquire um aspecto brechado, com feldspato alcalino pertítico e cristais de adulária numa matriz de quartzo secundário, clorita e outros filossilicatos. A rocha adquire, em função da alta conectividade das cavidades, um aspecto xenomórfico. Estas características são também comuns no AGbEp às profundidades de 63,6 a 64,3m e de 69,3 a 69,6m, onde o volume de cavidades interconectadas e preenchidas por quartzo tardio é muito grande.

Pelas características texturais apresentadas, pode-se deduzir que o processo de epissienitização potássica foi mais pervasivo e mais pronunciado no furo 250S/1200W, enquanto que no furo F12-GB a alteração potássica foi fissural, controlada por uma intensa zona de fraturamento e brechação, em um ambiente de

maior deformação dútil. Além disso, os epissienitos potássicos do furo 250S/1200W são mineralizados em cassiterita.

A epissienitização potássica no plúton Água Boa (F12-GB) foi desencadeada por um fluido alcalino e pobre em F, derivado por imiscibilidade de um fluido aquoso, ácido e de baixa salinidade, rico em F. A contínua interação deste fluido alcalino com o epissienito potássico teria produzido um fluido residual de salinidade moderada a alta e baixa temperatura (200-100°C), provavelmente responsável pela silicificação tardia do epissienito potássico (BORGES et al., 2009).

9.3 CORRELAÇÃO COM O FURO F18-GB

O furo F18-GB pertence à mesma malha de sondagem do furo F12-GB, tendo sido descrito e detalhado por Ferreira (2011), visando a caracterização petrográfica e mineralógica de greisens e epissienitos sódicos e potássicos. O furo interceptou uma variedade de granitos, por vezes oxidados, de textura porfirítica a equigranular, intrudidos por um albita-granito e topázio-albita-granito. Intercalados nesta sequência ocorrem epissienitos potássicos e sódicos (figura 37).

A fácies predominante é representada pelo biotita-álcali feldspato-granito porfirítico médio a grosso, caracterizado como encaixante imediata dos greisens, epissienitos sódicos e epissienitos potássicos.

Há ainda que se ressaltar o fato de haverem duas variedades de epissienito no furo F18-GB.

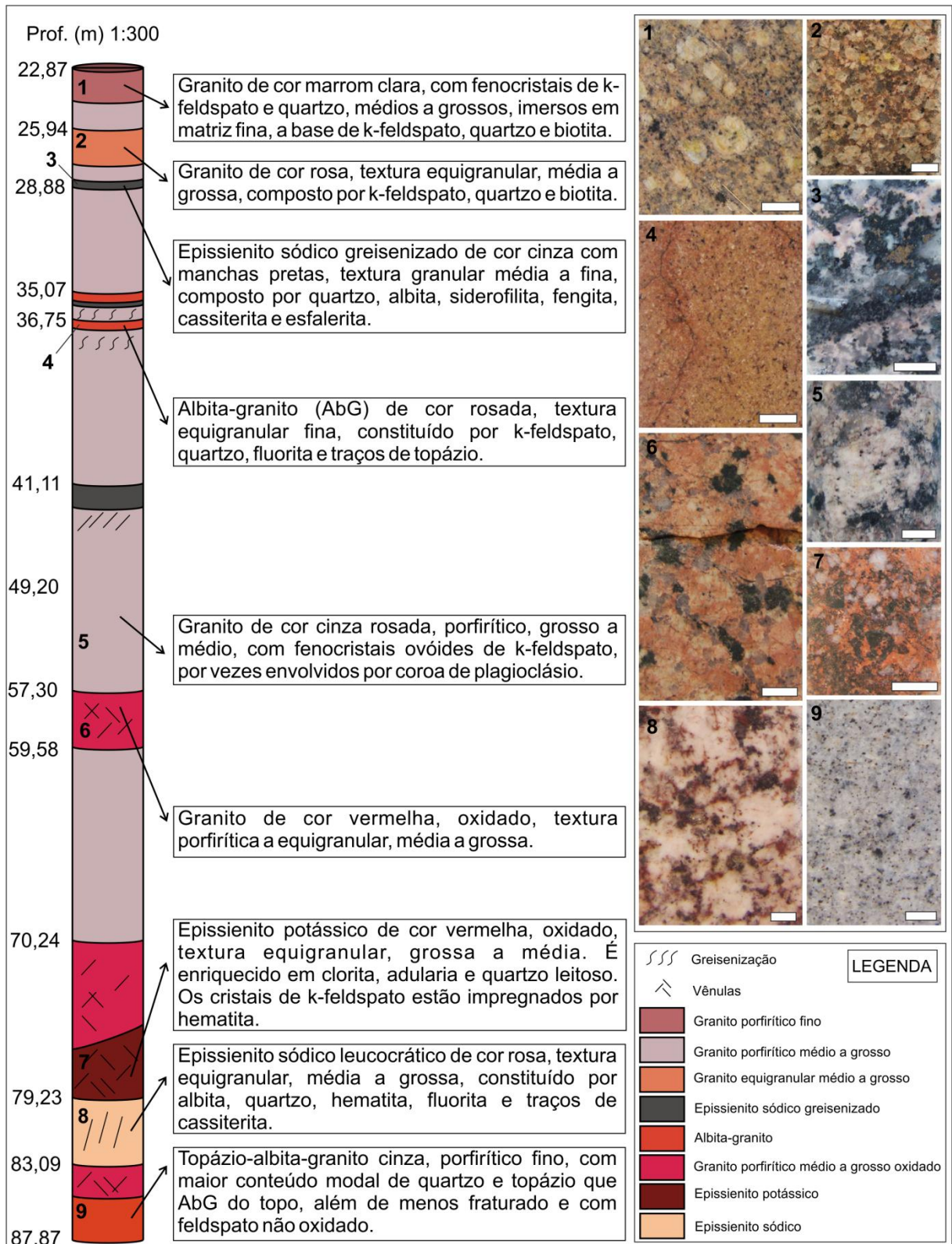
O epissienito sódico tem textura equigranular grossa a média e é constituído principalmente de albita e quartzo, com quantidades acessórias de hematita, fluorita, zircão, cassiterita, rutilo e berilo. Há níveis em que esse epissienito sódico é greisenizado, sendo composto por albita, siderofilita e quartzo, com subordinada esfalerita, fengita, clorita, zircão, fluorita, cassiterita, minerais opacos e anatásio.

O epissienito potássico é constituído por feldspato alcalino pertítico, quartzo, clorita, adularia, cassiterita, fluorita e fengita. Esta composição mineralógica é similar aos epissienitos do furo 250S/1200W, à exceção do feldspato alcalino, representado por um microclínio praticamente puro, em função da ausência de intercrescimentos pertíticos.

A mineralização no furo F18-GB hospeda-se nas porções mais cloritizadas dos epissienitos. No furo 250S/1200W, a mineralização não é produto de processos de greisenização, mas herdada do estágio magmático (formação do albita-granito), ocorrendo na forma disseminada, ou então relacionada à circulação de fluidos tardios, tanto como preenchimento de cavidades, como associada à zonas de intensa venulação na rocha.

Assim como no furo 250S/1200W, o processo de greisenização ocorreu de forma restrita no furo F18-GB, mas ainda assim mais pronunciada em relação ao primeiro.

Figura 37 – Perfil esquemático do furo F18-GB. A escala nas imagens equivale a 1 cm.



Fonte: Modificado de Ferreira (2011).

O epissienito potássico do furo F18-GB apresenta feições originais do protólito ainda preservadas, tais como mesopertitas e quartzo granofírico. No furo 250S/1200W, os epissienitos também preservam parcialmente as feições originais de seu protólito. O AGbEp tem textura similar ao ABGB, assim como a presença de alguns minerais característicos, como o microclínio com a dupla macla albita-periclina e o zircão altamente metamítico. O GEpsH mostra feições herdadas tanto do AGbEp como do FAGHP.

A ocorrência de um feldspato potássico formado no estágio hidrotermal, intensamente impregnado por hematita, é similar em ambas as zonas mineralizadas. No furo F18-GB, o feldspato foi interpretado como adulária, enquanto que no presente estudo o feldspato foi analisado por DRX, fornecendo composição de microclínio. Ambos os feldspatos comumente ocorrem preenchendo cavidades de dissolução, associada à clorita, fluorita, zircão e cassiterita, com algum quartzo.

Especificamente no caso da epissienitização sódica, não há dados suficientes para afirmar se a albitização observada em alguns fenocristais e, em menor proporção, na matriz do feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico poderia ser considerada o estágio inicial de um processo de epissienitização sódica. No caso do furo F18-GB, a formação dos epissienitos sódicos está associada à intrusão do topázio-albita-granito, que pode ser considerada a fácies mais evoluída do plúton Água Boa.

10 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo petrográfico realizado no furo 250S/1200W permitiu a caracterização de três tipos de rochas: 1) feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico (FAGHP), que é o litotipo mais preservado mineralógica e texturalmente, encontrando-se, por vezes, levemente greisenizado, albitizado e epissienitizado; 2) albita-granito de borda epissienitizado (AGbEp), constituído basicamente por microclínio e quartzo remanescentes do ABGB, microclínio hidrotermal e cavidades preenchidas por quartzo, fengita, clorita e fluorita, além de cassiterita e sulfetos disseminados e; 3) granito epissienitizado híbrido (GEpsH) de granulação fina, litotipo predominante no furo de sondagem, e com características texturais e mineralógicas herdadas das fácies FAGHP e ABGB, caracterizado pela ocorrência de microclínio hidrotermal e fases minerais herdadas das fácies FAGHP e ABGB, caracterizando-se, assim, como uma rocha híbrida.

Os estudos de petrografia macro e microscópica, microscopia eletrônica de varredura, com imageamento por CL e análises semiquantitativas por EDS, e de cristais de feldspatos por difração de raios-X, permitiram tecer as seguintes considerações sobre os epissienitos potássicos da borda oeste do plúton Madeira:

- O principal processo de alteração hidrotermal identificado na área, a epissienitização potássica, causou a lixiviação do quartzo e a dissolução total da albita da fácies de borda do albita-granito (ABGB), como também induziu a alteração parcial do FAGHP. Além da epissienitização, outros processos de alteração geraram mudanças nas feições texturais e mineralógicas das rochas, tais como a albitização (observada apenas nas amostras do FAGHP), greisenização (de caráter incipiente), e processos mais tardios, como sulfetação, silicificação e hematitização;

- A característica mais marcante do metassomatismo potássico foi a dissolução total da albita da fácies ABGB e sua completa substituição por microclínio em condições *subsolidus*. Por outro lado, o mesmo fluido que desestabilizou a albita estava em equilíbrio com o microclínio magmático, como demonstrado pela preservação de sua principal feição textural, a dupla macla albita-periclina, não observada no microclínio hidrotermal;

- O processo de epissienitização pode ter sido desencadeado por um fluido alcalino, enriquecido em K e oxidado, gerado: (a) a partir do FAGHP, através de um

processo de imiscibilidade líquido-fluido; ou, alternativamente, (b) pelas reações de autometassomatismo do ABG, uma vez que houve grande consumo de Na durante a cristalização de albita na fácies ABGN. Esta última hipótese é favorecida pela forte oxidação e hematitização que caracteriza tanto o ABGB quanto os litotipos do furo 250S/1200W;

- Apesar de não ter sido descrita mineralização associada ao FAGHP (COSTI, 2000), foi detectada no presente estudo a presença de cassiterita associada à hematita e quartzo, preenchendo fraturas tardias nesse litotipo, o que evidencia a sua precipitação em um estágio hidrotermal a partir de fluidos com alta fO_2 e baixa temperatura. Com base em análises por EDS, aliadas ao imageamento realizado em cristais de cassiterita do ABGN, comparativamente aqueles das rochas epissienitizadas, admite-se que os cristais com altos contrastes de intensidade de CL e teores muito baixos de Nb foram depositados por fluidos hidrotermais associados aos estágios tardios da epissienitização potássica. As cassiteritas do GEpsH mostram assinatura tanto magmática quanto hidrotermal, conforme demonstrado por suas características composicionais e texturais. Assim, se a cristalização magmática foi responsável pelo maior volume de mineralização associada ao depósito estanífero do plúton Madeira, o processo de epissienitização potássica contribuiu para a deposição de cristais de cassiterita relativamente mais puros, com menores conteúdos de Nb;

- Os estudos por MEV-CL também sugerem que houve uma modificação parcial na assinatura magmática de alguns cristais de cassiterita do ABGN (utilizados nos estudos comparativos), como indicado pela redução em seus teores de Nb e Ta e pelas texturas de corrosão ressaltadas por contrastes na intensidade de CL. Estas alterações foram induzidas, provavelmente, pelo mesmo processo de autometassomatismo que deu origem à fácies de borda do albita-granito;

- Os estudos petrográficos das rochas epissienitizadas mostraram que seus cristais de zircão são fases herdadas do albita-granito, com pequenos graus de recristalização. Isto é evidenciado principalmente pela ocorrência de inclusões de hematita paralelas às faces do cristal, indicando que as zonas de crescimento subsequentes se formaram tardiamente na sequência de cristalização magmática. Ainda, considera-se neste estudo que os fluidos hidrotermais envolvidos na epissienitização potássica não tenham modificado a assinatura magmática dos zircões das rochas derivadas do ABGB. A baixa mobilidade do Zr, conforme

demonstrada pela estabilidade do zircão, favorece a hipótese de um fluido de baixa alcalinidade, necessário para causar a desestabilização e dissolução da albita nas rochas epissienitizadas (CUNEY et al. 2012);

- Os estudos de difração de raios-X realizados em cristais das diferentes gerações de feldspato alcalino identificadas nas rochas epissienitizadas terminaram por descartar, *a priori*, a hipótese inicial da presença de adularia na paragênese hidrotermal. Em ambas as gerações a fase identificada foi o microclínio, sendo que a população de cristais mais finos inegavelmente formou-se em condições *subsolidus*. O microclínio é uma fase mineral extremamente comum em sistemas graníticos, com amplo intervalo de temperaturas de cristalização. Assim, sua precipitação nestas rochas sugere que a alteração potássica (substituição albita – microclínio) ocorreu sob temperaturas do intervalo pneumatolítico-hidrotermal (300-450°C), após o estágio precoce de desquartzificação das rochas graníticas.

Ao término do presente estudo, muitos são os questionamentos que se fazem, dentre os quais:

- (a) Por que o feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico não foi tão afetado pelos fluidos hidrotermais como foi o albita-granito de borda, uma vez que as duas fácies são consideradas comagmáticas e foram colocadas simultaneamente na crosta?
- (b) A interação entre os líquidos magmáticos que deram origem ao albita-granito, de caráter peralcalino, e ao feldspato alcalino-granito *hipersolvus* porfirítico, metaluminoso a peralcalino, pode ser considerado um processo de *mingling*, conforme discutido na literatura geológica? Ou seja, a mistura e interação entre magmas composicionalmente similares e com baixo contraste de viscosidade pode ser considerado um caso clássico de *mingling*?
- (c) As ocorrências de FAGHP no topo do furo 250S/1200W poderiam ser consideradas como enclaves em meio ao granito epissienitizado híbrido?
- (d) Onde foi depositado todo o Na gerado pela dissolução da albita do ABGB durante a sua epissienitização? A não ser pelas evidências localizadas de albitização parcial dos fenocristais de feldspato alcalino do FAGHP, não há registros de metassomatismo sódico nos litotipos do furo 250S/1200W.

São várias as propostas para abordagens futuras que podem contribuir ainda mais para a compreensão da evolução magmática e dos processos hidrotermais envolvidos na formação do plúton Madeira e seus depósitos estaníferos:

- i. Estudos de correlação lateral do furo 250S/1200W com furos adjacentes da malha de sondagem do plúton Madeira, na tentativa de estabelecer a extensão e continuidade lateral dos processos de interação magmática;
- ii. Análises de cristais de feldspato alcalino de todos os litotipos (FAGHP e de rochas epissienitizadas) por difração de raios-X, para adensar o grau de informação das diversas populações de feldspatos;
- iii. Análises de fases minerais (feldspatos, cassiterita, sulfetos) por microsonda eletrônica, para uma caracterização química mais precisa;
- iv. Estudos morfológicos e composicionais em cristais de quartzo e zircão, utilizando-se inicialmente análises em MEV-CL-EDS e, posteriormente, análises químicas quantitativas por WDS em microsonda eletrônica ou por LA-ICP-MS;
- v. Estudos de inclusões fluidas aprisionadas em cristais de quartzo magmático e hidrotermal e de fluorita, através de platina microtermométrica acoplada a microscópio ótico convencional, utilizando luz branca;
- vi. Estudos de inclusões fluidas aprisionadas em cristais de cassiterita magmática e hidrotermal, hematita e sulfetos opacos, utilizando platina microtermométrica acoplada a microscópio ótico utilizando luz infravermelha;
- vii. Estudos de inclusões de fundidos (*melt inclusions*) em cristais de quartzo, para a determinação da composição de líquidos silicáticos presentes durante sua formação no estágio magmático;
- viii. Análises de isótopos estáveis de O em cristais de quartzo e feldspatos hidrotermais, permitindo a caracterização da fonte dos fluidos envolvidos na sua formação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. E. *Evolução geológica da porção centro-sul do escudo das Guianas com base no estudo geoquímico, geocronológico e isotópico dos granitoides paleoproterozoicos do sudeste de Roraima, Brasil*. 2006. 227 f. Tese (doutorado em geociências) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2006.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Sciences Reviews*, n. 17, p. 1-29. 1981.
- ARAÚJO NETO, H.; MOREIRA, H. L. *Projeto estanho de Abonari*. Relatório Final, DNPM/CPRM, Manaus, 1976. 2 v.
- BASTOS NETO, A. C.; PEREIRA, V. P.; LIMA, E. F.; FERRON, J. M. T. M.; MINUZZI, O. R. R.; PRADO, M.; RONCHI, L. H.; FLORES, J. A. A.; FRANTZ, J. C.; PIRES, A. C.; PIEROSAN, R.; HOFF, R.; BOTELHO, N. F.; ROLIM, S. B.; ROCHA, F.; ULMANN, L. A jazida de criolita da Mina Pitinga (Amazonas). In: MARINI, O. J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B. W. (orgs.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília: DNPM/CT-MINERAL/ADIMB, 2005. p. 477-552.
- BASTOS NETO, A. C.; PEREIRA, V. P.; RONCHI, L. H.; LIMA, E. F.; FRANTZ, J. C. The world-class Sn, Nb, Ta, F (Y, REE, Li) deposit and the massive criolite associated with the albite-enriched facies of the Madeira A-type Granite, Pitinga mining district, Amazonas state, Brazil. *Canadian Mineralogist*, v. 47, p. 1329-1357. 2009.
- BORGES, R. M. K. *Petrografia e química mineral dos greisens associados ao Granito Água Boa - Mina Pitinga (AM): um estudo dos processos de formação de greisens*. 1997. 190 f. Dissertação (mestrado em geologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 1997.
- BORGES, R. M. K. *Greisens e epissienitos potássicos associados ao Granito Água Boa, Pitinga (AM): um estudo dos processos hidrotermais geradores de mineralizações estaníferas*. 2002. 383 f. Tese (doutorado em geoquímica e petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.
- BORGES, R. M. K.; DALL'AGNOL, R.; COSTI, H. T. Geologia, petrografia e química mineral das micas dos greisens estaníferos associados ao plúton Água Boa, Pitinga (AM). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n. 1, p. 51-62, 2003.
- BORGES, R. M. K.; LAMARÃO, C. N.; COSTI, H. T.; DALL'AGNOL, R.; FERREIRA, W. V. A. Baixas razões Zr/Hf em zircões de epissienitos estaníferos hospedados no plúton Água Boa, Província Pitinga (AM): assinatura magmática ou hidrotermal? In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 30, 2011, Gramado – RS. CD-ROM. Gramado: SBG, 2011.

BORGES, R. M. K.; VILLAS, R. N. N.; FUZIKAWA, K.; DALL'AGNOL, R.; PIMENTA, M. A. Estados de oxidação de fluidos aquo-carbônicos associados a greisens estaníferos, Mina de Pitinga (AM): implicações na precipitação de cassiterita. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41, 2002, João Pessoa - PB. *Anais...* João Pessoa: SBG, 2002. p. 406.

BORGES, R. M. K.; VILLAS, R. N. N.; FUZIKAWA, K.; DALL'AGNOL, R.; PIMENTA, M. A. Phase separation, fluid mixing, and origin of the greisens and potassic episyenite associated with the Água Boa plúton, Pitinga tin province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 27, p.161-183. 2009.

CHAROY, B.; POLLARD, P. J. Albite-rich, silica-depleted metasomatic rocks at Emuford, Northeast Queensland: mineralogical, geochemical, and fluid inclusion constraints on hydrothermal evolution and tin mineralization. *Economic Geology*, v. 84, p. 1850-1874. 1989.

CHEILLETZ, A.; GIULIANI, G. Role de la déformation du granite dans la genèse des episyénites feldspathiques des massifs de Lovios-Geres (Galice) er des Zaèr (Maroc Central). *Mineralium Deposita*, v. 17, p. 387-400. 1982.

COSTI, H. T. *Petrologia de granitos alcalinos com alto flúor mineralizados em metais raros: o exemplo do albita-granito da Mina Pitinga, Amazonas, Brasil*. 2000. 345 f. Tese (doutorado em geoquímica e petrologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2000.

COSTI, H. T.; BORGES, R. M. K.; DALL'AGNOL, R. Depósitos de estanho da Mina Pitinga, estado do Amazonas. In: MARINI, O. J.; QUEIROZ, E. T.; RAMOS, B. W. (org.). *Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia*. Brasília: VGarTe, 2005. v. 1, p. 391-475.

COSTI, H. T.; DALL'AGNOL, R.; BORGES, R. M. K.; MINUZZI, O. R. R.; TEIXEIRA, J. T. Tin-bearing sodic episyenites associated with the Proterozoic, A-type Água Boa granite, Pitinga mine, Amazonian craton, Brazil. *Gondwana Research*, v. 5, p. 435-451. 2002.

COSTI, H. T.; DALL'AGNOL, R.; MOURA, C. A. V. Geology and Pb-Pb geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks of Pitinga Province, Amazonian Craton, Northern Brazil. *International Geology Review*, v. 42, p. 832-849. 2000.

COSTI, H. T.; VALÉRIO, C. S.; ALVES, M. A. S.; VALMIR, S. S. Overview of the geology of southernmost Guyana Shield, north of Presidente Figueiredo district, NE Amazonas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 11, 2009, Manaus. *Resumos...* Manaus: SBG-Núcleo Norte, 2009. (Não paginado).

CPRM (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL). *Carta geológica do Brasil ao milionésimo: sistema de informações geográficas - SIG. Folha SA.20 Manaus*. Brasília, CPRM, 2004a. CD 14/41. 41 CD-ROM.

CPRM (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL). *Carta geológica do Brasil ao milionésimo: sistema de informações geográficas - SIG. Folha SA.21 Santarém*. Brasília, CPRM, 2004b. CD 8/41. 41 CD-ROM.

CUNEY, M; EMETZ, A; MERCADIER, J; MYKCHAYLOV, V; SHUNKO, V; YUSLENKO, A. Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: a review of some of the major deposits and genetic constraints. *Ore Geology Reviews*, v. 44, p. 82-106. 2012.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. *An introduction to the rock-forming minerals*. Harlow: Longman. 2^a ed. 1992, 696p.

FEIO, G. R. L.; DALL'AGNOL, R.; BORGES, R. M. K. Greisens associados ao topázio-granito do plúton Água Boa, Província Estanífera de Pitinga: petrografia e balanço de massa. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 3, p. 607-624. 2007.

FEIO, G. R. L.; DALL'AGNOL, R.; BORGES, R. M. K.; COSTI, H. T.; LAMARÃO, C. N. Mineralogia dos greisens da área Grota Rica, Plúton Água Boa, Pitinga, Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, n. 3, p. 436-446. 2011.

FERREIRA, W. V. A. *Estudo petrográfico, mineralógico e da alteração hidrotermal associada à fácies hornblenda-biotita-álcali feldspato granito (Furo F18-GB) do plúton Água Boa, Província Estanífera de Pitinga (AM)*. 2011. 121 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências. 2011.

FERRON, J. M. T. M. *Geologia regional e geocronologia Pb-Pb de rochas graníticas e vulcânicas paleoproterozóicas da Província de Pitinga, Craton amazônico*. 2006. 198 f. Tese (doutorado em geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 2006.

FERRON, J. M. T. M.; BASTOS NETO, A. C.; LIMA, E. F.; COSTI, H. T.; MOURA, C. A. V.; PRADO, M.; PIEROSAN, R.; GALARZA, M. A. Geologia e geocronologia Pb-Pb de rochas graníticas e vulcânicas ácidas a intermediárias paleoproterozoicas da Província Pitinga, Craton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 36, n. 3. p. 499-512, set. 2006.

GIBBS, A. K.; BARRON, C. The Guiana shield reviewed. *Episodes*, v. 6, p. 7-14. 1983.

GÖTZE, J.; PLÖTZE, M.; GRAUPNER, T.; HALLBAUER, D. K.; BRAY, C. Trace element incorporation into quartz: a combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis and gas chromatography. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 68, p. 3741-3759. 2004.

HASUI Y.; HARALY N. L. E.; SCHOBENHAUS C. Elementos geofísicos e geológicos da região amazônica: subsídios para o modelo geodinâmico. In: SYMPOSIUM AMAZÔNICO, 2, 1984, Manaus, *Anais*, Manaus: SBG, 1984. p. 129-148.

HORBE, M. A.; HORBE, A. M. C.; COSTI, H. T.; TEIXEIRA, J. T. Geochemical characteristics of cryolite-tin-bearing granites from Pitinga Mine, northwestern Brazil - a review. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 40, p. 227-249. 1991.

HORBE, M. A.; HORBE, A. M. C.; TEIXEIRA, J. T.; COSTI, H. T. Granito Madeira: petrologia, petroquímica e mineralizações. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2., 1985, Belém. *Anais*, Belém: SBG, 1985. v. 3, p. 284-320.

KEMPE, U.; GRUNER, T.; RENNO, A. D.; WOLF, D. Hf-rich zircon in rare-metal bearing granites: magmatic or metasomatic origin? In: PAPUNEN, H. (ed.). *Mineral deposits: research and exploration*. Rotterdam: Balkema, 1997. p. 643-646.

KEMPE, U.; GRUNER, T.; RENNO, A. D.; WOLF, D.; RENÉ, M. Discussion on Wang et al. (2000) Chemistry of Hf-rich zircons from the Laoshan I- and A-type granites, Eastern China. *Mineral Magazine*, v. 64, p. 867-877, 2004.

LAMARÃO, C. N.; DALL'AGNOL, R.; SOLEDADE, G. L.; SILVA, J. S. Variações composicionais de zircão em granitos anorogênicos proterozóicos do Cráton Amazônico: implicações metalogenéticas. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 693-704, dez. 2007.

LENHARO, S. L. R. *Evolução magmática e modelo metalogenético dos granitos mineralizados da região de Pitinga, Amazonas, Brasil*. 1998. 290 f. Tese (doutorado em geologia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 1998.

LENHARO, S. R. L.; MOURA, M. A.; BOTELHO, N. F. Petrogenetic and mineralization processes in Paleo- to Mesoproterozoic rapakivi granites: examples from Pitinga and Goiás, Brazil. *Precambrian Research*, v. 119, p. 277-299. 2002.

LENHARO, S. R. L.; POLLARD, P. J.; BORN, H. Matrix rock texture in the Pitinga Topaz Granite, Amazonas, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 2, p. 238-241. 2000.

LENHARO, S. R. L.; POLLARD, P. J.; BORN, H. Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare-metals mineralization at the Pitinga mine, Amazonas, Brazil. *Lithos*, v. 66, p. 37-61. 2003.

LEROY, J. Episyénitisation dans les gisements d'uranium du Bernardan (Marche): comparaison avec des gisements similaires du Nord-Ouest du Massif Central français. *Mineralium Deposita*, 19, p. 26-35. 1984.

MARUEJOL, P. *Metasomatose alcaline et minéralisation uranifères: les albitites du gisement de Lagoa Real (Bahia, Brésil), et exemples complémentaires de Xihuashan (SE Chine), Zheltorechensk (Ukraine) et Chhuling Khola (Népal central)*. 1989. Tese (doutorado), Institut National Polytechnique de Lorraine, 428 p. 1989.

MINUZZI, O. R. R. *Gênese e evolução da mineralização de criolita, pirocloro e columbita da subfácies albíta granito de núcleo, Mina Pitinga, Amazonas, Brasil*. 2005. 229 f. Tese (doutorado em geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, 2005.

MÜLLER, A.; SELTMANN, R.; BEHR, H. J. Application of cathodoluminescence to magmatic quartz in tin granite: case study from the Schellerhau Granite Complex, Eastern Ertgebirge, Germany. *Mineralium Deposita*, v. 35, p. 169-185. 2000.

PETERSSON, J.; ELIASSON, T. Mineral evolution and element mobility during episyenitization (dequartzification) and albitization in the postkinematic Bohus granite, southwest Sweden. *Lithos*, v. 42, p. 123-146. 1997.

PIRAJNO, F. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Australia: Geological Survey of Western Australia, Perth, WA, 2009. 1250 p.

PIRES, A. C. *A Gagarinita e fases associadas no Granito Madeira (Pitinga, Amazonas)*. 2005. 122 f. Dissertação (mestrado em geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre. 2005.

RECIO, C.; FALLICK, A. E.; UGIDOS, J. M.; STEPHENS, W. E. Characterization of multiple fluid-granite interaction processes in the episyenites of Avila-Béjar, Central Iberian Massif, Spain. *Chemical Geology* 143, p. 127–144. 1997.

REIS, N. J.; ALMEIDA, M. E.; RIKER, S. L.; FERREIRA, A. L. *Texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do Estado do Amazonas, Escala 1:1.000.000*. CPRM/CIAMA-AM. Serviço Geológico do Brasil, Manaus, **2006**.

SANTOS, J. O. S.; HARTMANN, L. A.; GROVES, D. I.; MCNAUGHTON, N. J.; PLETCHER, L. R. A new understanding of the Provinces of Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, v.3, n.4, p. 453-488. 2000.

SANTOS, J. O. S.; HARTMANN, L. A.; MCNAUGHTON, N. J.; FLETCHU, I. R. Timing of mafic magmatism in the Tapajós Province (Brazil) and implications for the evolution of the Amazon Craton: evidence from baddeleyite and zircon U-Pb SHRIMP geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, p. 409-429. 2002.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the Amazonian craton. *Episodes*, v. 22, p. 174-182. 1999.

TASSINARI, C. C. G.; BETTENCOURT, J. S.; GERALDES, M. C.; MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. The Amazon craton. In: CORDANI, U.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (ed.). *Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro: International Geological Congress, 31, 1999, p. 41-95.

TEIXEIRA, J. T.; COSTI, H. T.; MINUZZI, O. R. R.; SOARES, E. A. A. Depósitos primários de criolita, cassiterita, xenotímio e columbita em apogranito - mina do Pitinga (AM). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, São Paulo, *Anais*, v. 1, p. 212-213. 1992.

TEIXEIRA, W.; TASSINARI, C. C. G.; CORDANI, U. G.; KAWASHITA, K. A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. *Precambrian Research*, v. 42, p. 213-227. 1989.

VALÉRIO, C. S. *Magmatismo Paleoproterozoico do extremo sul do escudo das Guianas, município de Presidente Figueiredo (AM): geologia, geoquímica e geocronologia Pb-Pb em zircão*. 2006. Dissertação (mestrado em geociências) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, 112 p. 2006.

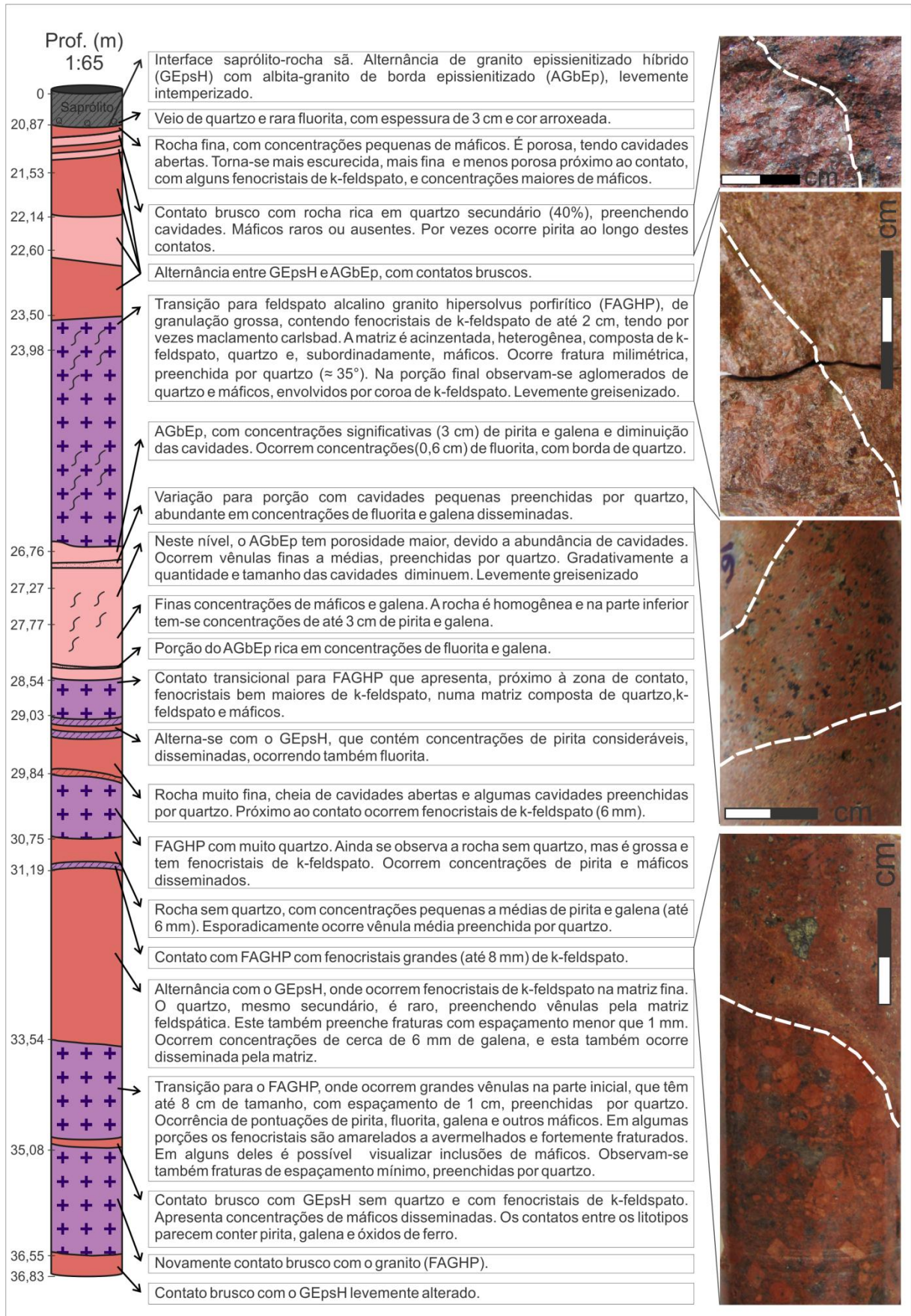
VEIGA JÚNIOR, J. P.; NUNES, A. C. B.; SOUZA, E. C.; SANTOS, J. O. S.; AMARAL, J. E.; PESSOA, M. R.; SOUZA, S. A. S. *Projeto sulfetos de Uatumã; Relatório Final*. DNPM/CPRM, Manaus, 1979. 6 v.

WANG, R. C.; ZHAO, G. T.; LU, J. J.; CHEN, X. M.; XU, S. J.; WANG, D. Z. Chemistry of Hf-zircons from the Laoshan land A-type granites, Eastern China. *Mineral. Magazine*, v. 64, p. 867-877. 2000.

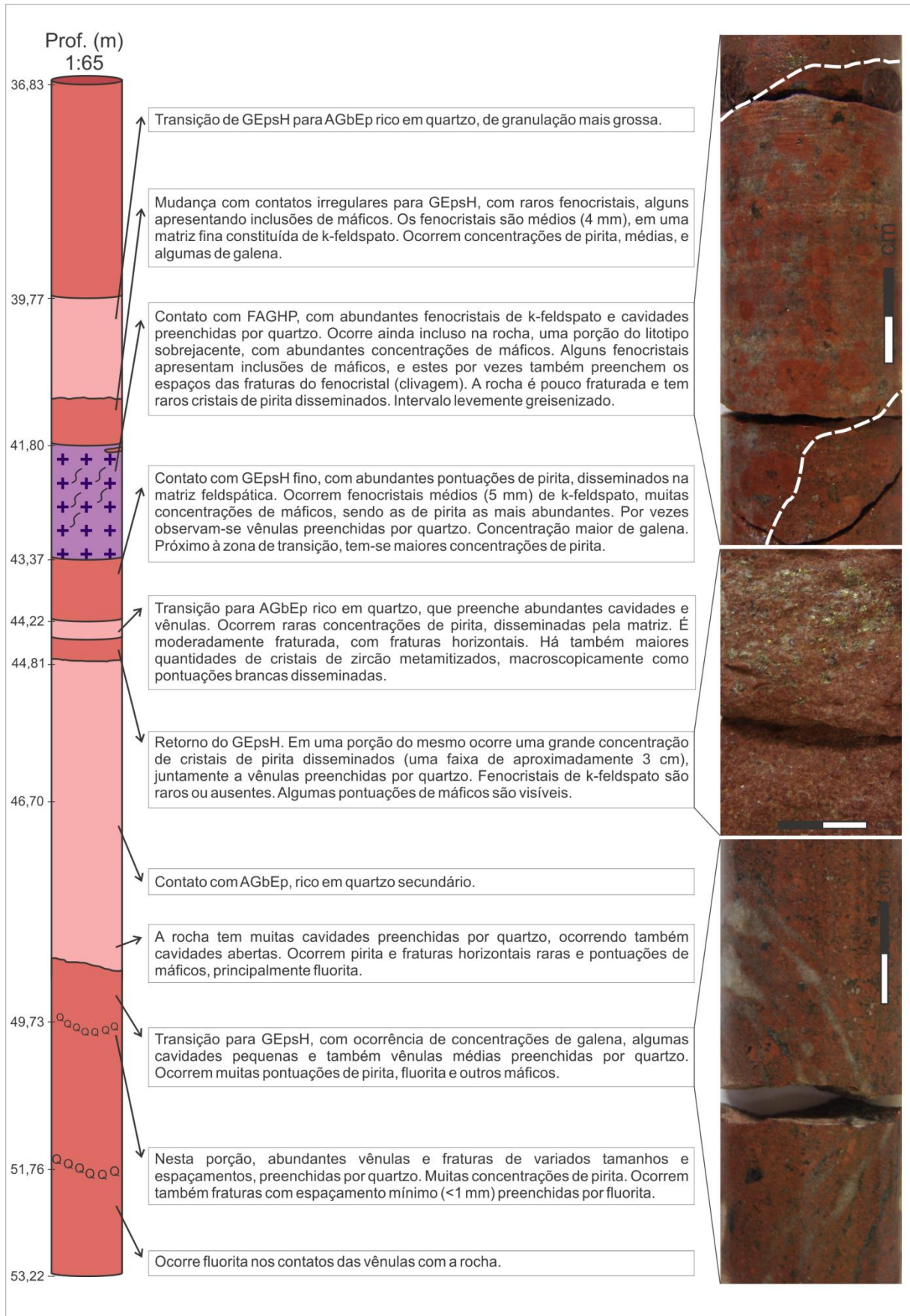
WHITNEY, D. L.; EVANS, B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, v. 95, p. 185-187. 2010.

ANEXOS

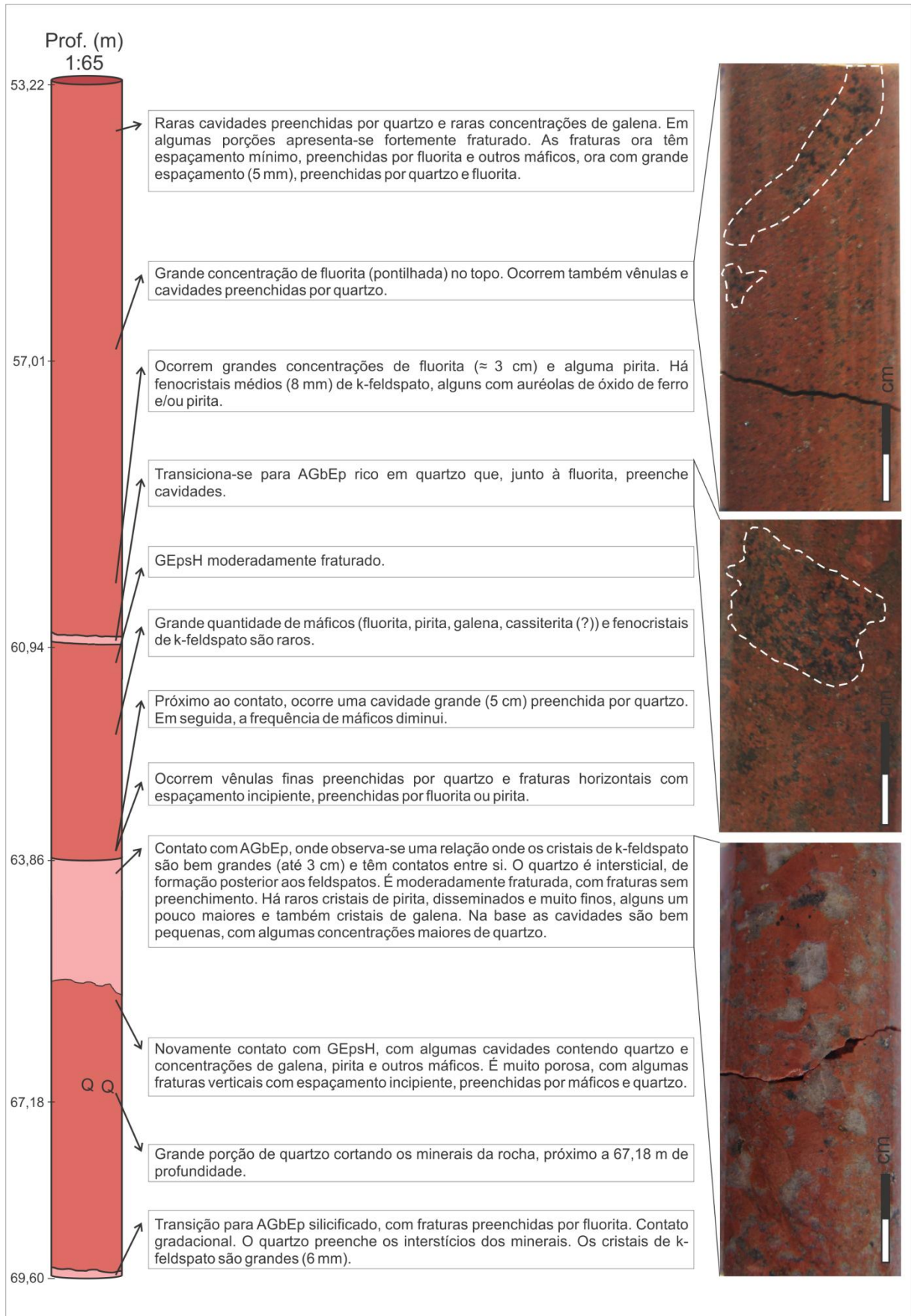
ANEXO A – Log de Sondagem do furo 250S/1200W



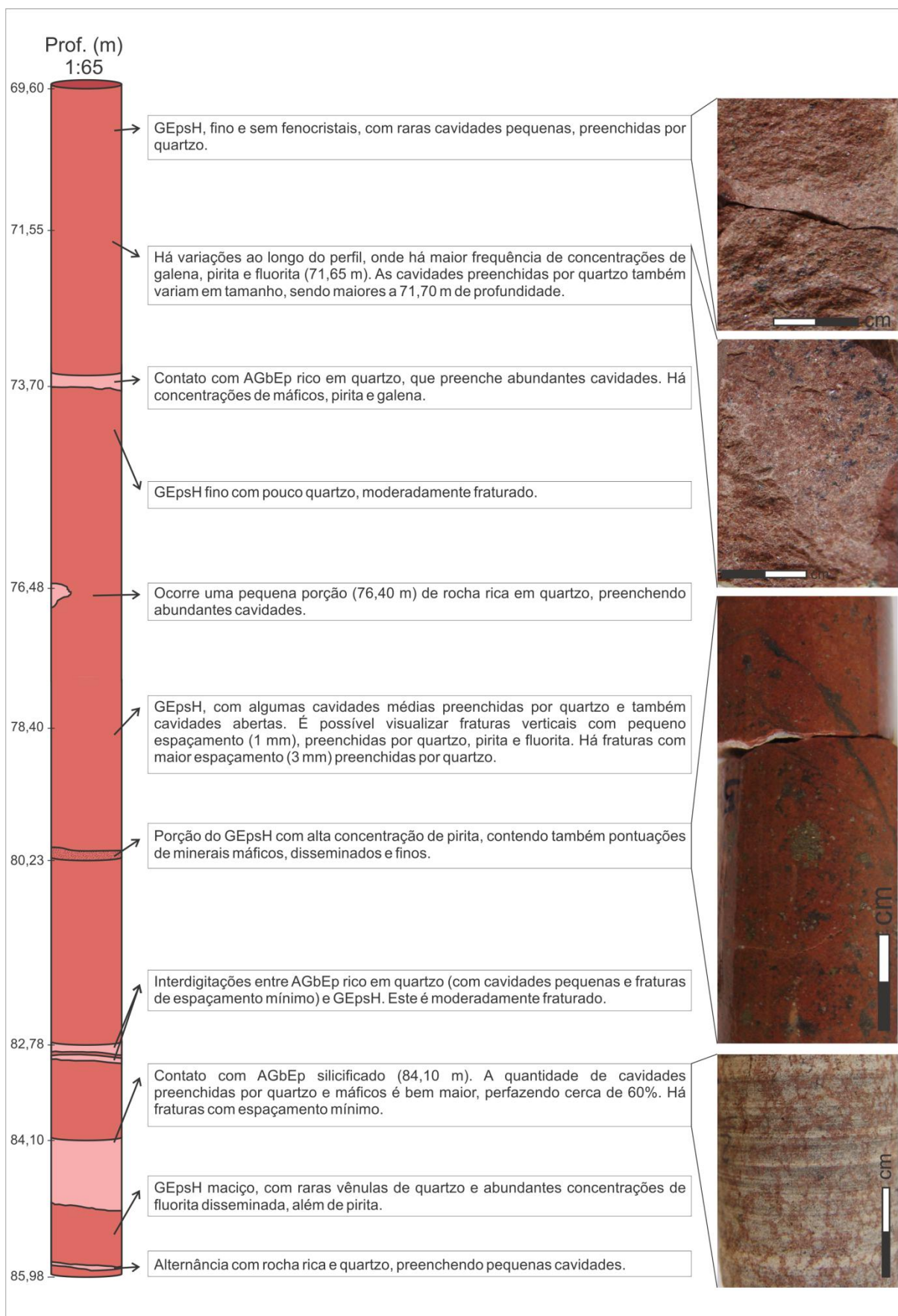
ANEXO A – Log de Sondagem do furo 250S/1200W (cont.)



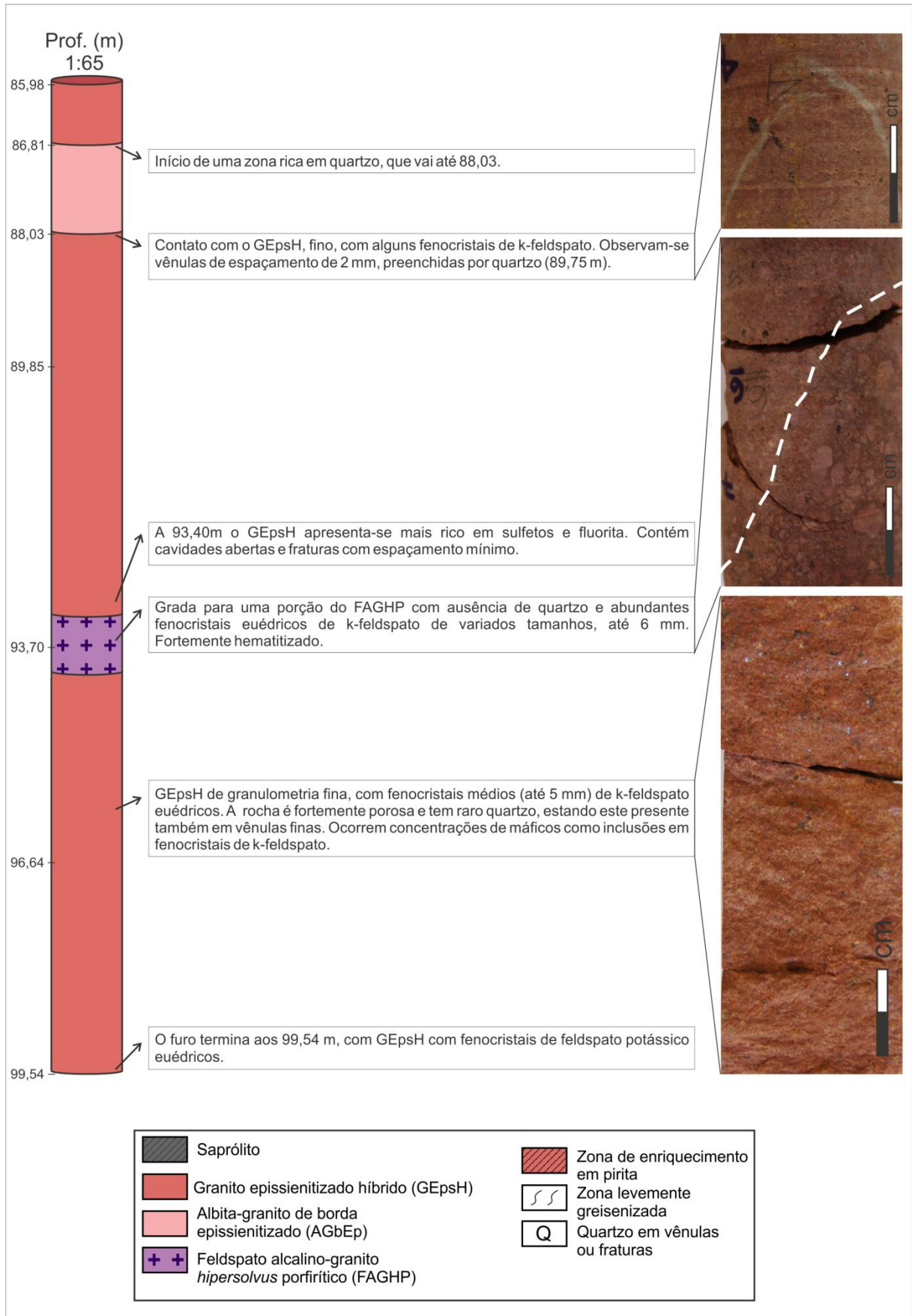
ANEXO A – Log de Sondagem do furo 250S/1200W (cont.)



ANEXO A – Log de Sondagem do furo 250S/1200W (cont.)



ANEXO A – Log de Sondagem do furo 250S/1200W (cont.)



ANEXO B – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de zircão do FAGHP.

Amostra	ZIRCÃO											
	SiO_2	P_2O_5	CaO	Y_2O_3	ZrO_2	Nb_2O_5	BaO	Ce_2O_3	HfO_2	Ta_2O_5	ThO_2	UO_2
<i>AMT-14 (fig. 14)</i>												
Spec 1	27,86	0,00	0,68	0,69	64,10	1,81	0,38	0,43	2,37	1,07	0,22	0,38
Spec 2	24,38	0,00	0,67	0,51	68,29	1,98	0,25	0,38	2,44	0,76	0,14	0,21
Spec 3	24,41	0,00	0,17	0,72	68,31	1,52	0,37	0,28	2,37	1,35	0,16	0,34
Spec 4	25,34	0,00	0,95	1,47	65,28	1,63	0,13	0,72	2,58	1,06	0,24	0,62
Spec 5	24,69	0,00	0,10	0,80	67,12	2,10	0,48	0,43	2,86	1,10	0,00	0,31
Spec 6	23,88	0,00	0,75	3,32	59,71	1,29	0,43	5,10	2,96	1,08	0,49	1,00
Spec 7	24,75	0,38	0,31	0,77	67,09	1,72	0,32	0,40	1,91	1,83	0,22	0,29
Spec 8	25,66	0,49	1,03	1,29	64,49	1,51	0,34	0,66	2,58	0,88	0,23	0,83
Spec 9	23,82	0,69	0,21	1,10	66,32	2,10	0,39	1,36	2,42	0,95	0,64	0,00
Spec 10	24,18	0,28	0,42	0,83	68,11	1,55	0,29	0,48	2,07	1,43	0,18	0,19
<i>AMT-17A (fig. 15A1)</i>												
Spec 1	24,30	0,12	0,28	0,88	67,81	1,61	0,48	0,69	2,40	1,09	0,17	0,17
Spec 2	24,39	0,00	0,12	0,61	68,10	1,94	0,19	0,52	2,68	0,89	0,09	0,46
Spec 3	24,73	0,16	0,22	0,67	67,80	1,75	0,17	0,65	2,31	1,09	0,22	0,23
Spec 4	24,25	0,00	0,27	0,70	67,73	1,95	0,34	0,27	3,39	0,66	0,15	0,29
Spec 5	24,52	0,00	0,10	0,86	69,14	1,23	0,28	0,78	1,53	1,19	0,14	0,24
Spec 6	24,67	0,63	0,10	0,70	67,68	2,04	0,80	0,09	1,77	1,16	0,05	0,30
Spec 7	24,62	0,08	0,08	1,06	67,66	1,96	0,48	0,30	2,29	1,19	0,21	0,07
Spec 8	24,77	0,00	0,10	0,79	68,23	1,75	0,24	0,60	2,04	1,09	0,08	0,31
Spec 9	24,12	0,02	0,13	0,93	67,89	2,17	0,64	0,43	2,52	0,71	0,00	0,45
Spec 10	23,67	0,00	0,20	0,83	68,69	2,60	0,25	0,49	2,03	0,95	0,19	0,10
Spec 11	24,47	0,00	0,09	0,61	68,24	2,42	0,43	0,47	2,06	0,87	0,13	0,20
Spec 12	24,00	0,16	0,10	0,60	68,36	2,31	0,29	0,65	1,73	1,29	0,10	0,42
Spec 13	24,16	0,13	0,17	0,90	68,38	1,58	0,58	0,43	2,31	0,91	0,26	0,19
Spec 14	24,57	0,00	0,13	0,78	67,85	1,89	0,44	0,48	2,29	1,17	0,13	0,26
Spec 15	24,29	0,00	0,07	0,85	67,11	2,04	0,65	0,57	2,46	1,29	0,66	0,00
Spec 16	21,99	3,33	0,19	6,66	61,41	1,25	0,32	0,44	2,66	1,39	0,06	0,29
Spec 17	24,12	0,00	0,13	1,04	67,84	2,27	0,43	0,52	2,44	0,84	0,00	0,39
Spec 18	23,81	0,00	0,04	0,96	68,47	2,13	0,41	0,49	2,25	1,03	0,15	0,27
<i>AMT-17A (fig. 15A2)</i>												
Spec 1	24,57	0,79	0,06	0,60	68,32	1,85	0,38	0,59	1,78	0,72	0,29	0,05
Spec 2	24,33	0,00	0,08	0,89	68,90	1,92	0,63	0,17	1,77	1,07	0,06	0,18
Spec 3	24,36	0,00	0,11	0,96	66,69	1,62	0,89	0,50	3,15	1,39	0,10	0,23
Spec 4	23,45	0,00	0,28	1,01	66,88	2,08	0,38	0,54	3,97	0,82	0,17	0,42
Spec 5	24,01	0,43	0,35	0,61	68,28	1,92	0,39	0,42	2,02	1,12	0,28	0,17
Spec 6	21,23	0,52	0,07	0,74	57,31	1,78	9,49	0,00	3,96	3,97	0,31	0,61

ANEXO C – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de xenotímio do FAGHP.

Amostra	XENOTÍMIO										
	SiO_2	P_2O_5	Y_2O_3	La_2O_3	Ce_2O_3	Nd_2O_3	Gd_2O_3	Dy_2O_3	Er_2O_3	Yb_2O_3	ThO_2
<i>AMT-17A (fig. 18A)</i>											
Spec 1	0,10	29,13	27,75	0,66	0,44	0,74	3,27	14,29	10,63	12,55	0,44
Spec 2	0,00	30,20	33,05	0,39	0,62	0,33	2,26	9,89	9,20	13,73	0,32
Spec 3	0,08	32,03	51,43	0,54	0,58	0,01	0,94	3,01	4,20	6,93	0,26
Spec 4	0,00	31,72	42,38	0,70	0,64	0,48	1,75	5,62	5,38	10,97	0,35
Spec 5	0,00	31,19	36,62	0,43	0,53	0,59	1,96	9,00	7,11	12,22	0,34
Spec 6	0,00	31,26	36,37	0,85	0,46	1,04	3,09	9,92	7,33	9,23	0,46
<i>AMT-17A (fig. 18B)</i>											
Spec 1	0,00	30,24	32,03	0,58	0,51	1,25	2,60	10,85	9,29	12,05	0,58
Spec 2	0,00	32,12	42,15	0,74	0,33	0,30	1,30	5,97	6,75	10,10	0,24
Spec 3	0,00	30,86	32,90	0,74	0,68	0,01	2,44	8,73	9,13	14,02	0,49
Spec 4	0,04	30,58	40,39	0,46	0,52	0,42	2,15	6,97	6,77	11,50	0,19
Spec 5	0,00	33,28	48,15	0,46	0,45	0,33	0,61	3,15	4,58	8,77	0,23

ANEXO D – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de bastnasita do FAGHP.

Amostra	BASTNASITA						
	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>F</i>	<i>Y</i>	<i>La</i>	<i>Ce</i>	<i>Nd</i>
<i>AMT-17A</i>							
Spec 2	3,93	15,13	5,72	1,55	18,34	46,56	8,77
Spec 3	3,58	15,28	5,62	1,42	16,03	46,13	11,95
Spec 4	3,38	14,66	5,53	2,16	14,74	43,89	15,64
Spec 5	4,08	14,96	5,60	1,41	15,38	45,69	12,89

ANEXO E – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de zircão do AGbEp.

Amostra	ZIRCÃO											
	SiO_2	P_2O_5	CaO	Y_2O_3	ZrO_2	Nb_2O_5	BaO	Ce_2O_3	HfO_2	Ta_2O_5	ThO_2	UO_2
<i>AMT-2 (fig. 20A)</i>												
Spec 4	24,32	0,00	0,30	0,78	65,77	2,64	0,16	0,49	3,80	1,34	0,13	0,27
Spec 5	24,21	0,00	0,30	0,86	67,40	2,88	0,41	0,28	2,20	1,08	0,16	0,23
Spec 6	23,95	0,47	0,11	0,88	64,01	2,79	0,31	0,26	6,11	0,74	0,22	0,16
Spec 7	24,64	0,00	0,07	0,54	64,02	2,40	0,50	0,49	6,46	0,55	0,11	0,21
Spec 8	24,46	0,00	0,32	0,46	64,93	2,32	0,22	0,44	5,67	0,65	0,27	0,26
Spec 10	23,82	0,00	0,24	0,96	65,47	2,28	0,45	0,37	3,66	1,23	1,23	0,28
Spec 11	23,91	0,00	0,18	0,90	65,42	2,29	0,20	0,53	5,14	1,00	0,25	0,18
Spec 12	24,09	0,00	0,22	0,84	64,86	2,28	0,55	0,34	5,30	1,00	0,29	0,23
Spec 13	24,25	0,00	0,50	0,95	65,03	2,10	0,41	0,79	4,84	0,64	0,11	0,38
Spec 14	23,92	0,00	0,72	1,07	64,47	2,26	0,60	0,89	4,61	0,90	0,18	0,37
Spec 15	24,23	0,33	0,57	0,80	64,63	2,36	0,41	0,33	4,49	1,46	0,20	0,21
Spec 16	23,73	0,00	0,09	0,67	63,30	2,06	0,39	0,42	8,08	0,75	0,13	0,37
<i>AMT-10 (fig. 20C)</i>												
Spec 1	24,13	0,65	0,08	0,81	62,73	1,59	0,39	0,25	8,50	0,55	0,00	0,33
Spec 2	23,54	0,77	0,36	1,01	66,31	1,34	0,59	0,41	4,08	1,11	0,00	0,49
Spec 3	23,94	0,28	0,19	0,87	67,30	1,60	0,39	0,35	3,52	1,10	0,19	0,27
Spec 4	23,40	1,14	0,60	0,74	66,12	1,98	0,40	0,58	2,83	1,54	0,00	0,66
Spec 5	24,32	0,93	0,49	1,36	65,99	0,84	0,24	0,58	2,75	1,19	0,42	0,87
Spec 6	23,49	1,05	0,50	1,16	64,34	1,56	0,24	0,36	5,88	0,74	0,50	0,18
Spec 7	23,58	1,12	0,82	1,26	65,07	1,84	0,43	0,54	3,38	1,12	0,16	0,67
Spec 8	24,57	0,42	0,04	0,80	64,59	1,65	0,62	0,46	5,97	0,45	0,28	0,15
Spec 9	23,96	0,89	0,18	0,62	66,52	1,74	0,21	0,70	3,61	1,06	0,13	0,37
Spec 10	24,06	0,36	0,07	0,63	62,99	1,78	0,49	0,36	8,09	0,79	0,15	0,23
Spec 11	23,86	0,82	0,11	0,75	65,74	2,03	0,45	0,39	4,70	0,69	0,18	0,28
Spec 12	23,34	0,80	0,45	0,80	67,60	1,54	0,24	0,71	3,20	0,81	0,36	0,15

ANEXO F – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de cassiterita do AGbEp.

Amostra	CASSITERITA				
	<i>FeO</i>	<i>Nb₂O₅</i>	<i>SnO₂</i>	<i>Ta₂O₅</i>	<i>WO₂</i>
Spec 1	0,17	0,40	96,34	1,70	1,19
Spec 2	0,18	0,35	96,86	1,37	1,05
Spec 3	0,21	0,52	97,00	1,09	0,93
Spec 4	0,19	0,67	96,05	1,73	1,15
Spec 5	0,12	0,66	96,67	1,22	1,20
Spec 6	0,22	0,42	96,47	1,27	1,37
Spec 7	0,10	0,88	96,75	1,19	0,97
Spec 8	0,12	0,62	97,20	1,32	0,60
Spec 9	0,26	1,07	95,60	1,53	1,26
Spec 10	0,11	0,50	96,77	1,16	1,34
Spec 11	0,18	0,45	96,88	1,08	1,20
Spec 12	0,18	0,32	96,63	1,32	1,34

ANEXO G – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de zircão do GEpsH.

Amostra	ZIRCÃO											
	<i>SiO₂</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>CaO</i>	<i>Y₂O₃</i>	<i>ZrO₂</i>	<i>Nb₂O₅</i>	<i>BaO</i>	<i>Ce₂O₃</i>	<i>HfO₂</i>	<i>Ta₂O₅</i>	<i>ThO₂</i>	<i>UO₂</i>
Spec 1	24,02	0,00	0,10	0,59	63,00	2,77	0,25	0,40	7,86	0,45	0,34	0,22
Spec 2	24,93	0,00	0,08	0,75	62,51	2,63	0,42	0,56	7,11	0,66	0,03	0,31
Spec 3	24,34	0,22	0,14	1,01	64,55	2,37	0,48	0,26	5,48	0,50	0,26	0,40
Spec 4	23,81	0,25	0,21	0,38	56,55	2,90	0,20	0,44	14,27	0,36	0,46	0,16
Spec 5	23,98	0,17	0,07	0,14	64,46	2,62	0,24	0,39	7,08	0,59	0,17	0,08
Spec 6	24,05	0,00	0,05	0,42	61,79	3,11	0,43	0,38	8,57	0,72	0,10	0,39
Spec 7	24,28	0,20	0,12	0,62	63,21	3,18	0,40	0,57	5,67	1,29	0,19	0,31
Spec 8	23,98	0,00	0,63	1,05	63,77	2,67	0,79	0,51	5,17	0,67	0,17	0,58
Spec 9	23,96	0,17	0,07	0,52	63,62	2,32	0,56	0,23	7,63	0,33	0,34	0,24
Spec 10	25,00	0,00	0,07	0,54	59,17	3,10	1,02	0,39	9,36	0,98	0,23	0,15
Spec 11	24,55	0,19	0,41	0,39	62,07	3,02	0,30	0,95	6,87	0,76	0,00	0,46
Spec 12	23,70	0,00	0,10	0,79	64,52	2,62	0,31	0,60	6,00	0,92	0,21	0,22
Spec 13	23,92	0,27	0,07	0,54	64,44	2,88	0,78	0,16	5,87	0,60	0,23	0,23
Spec 14	24,01	0,58	0,20	0,81	65,34	2,88	0,46	0,38	3,66	1,11	0,53	0,05
Spec 15	24,33	0,00	0,25	0,80	65,56	1,91	0,38	0,55	4,89	0,55	0,29	0,48
Spec 16	24,63	0,43	0,15	0,76	62,47	2,59	0,31	0,39	4,20	0,88	2,93	0,26
Spec 18	23,01	0,00	0,14	1,38	64,58	2,63	0,46	0,69	4,41	1,03	1,66	0,02

ANEXO H – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de cassiterita do GEpsH.

Amostra	CASSITERITA					
	FeO	Y ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	SnO ₂	Ta ₂ O ₅	UO ₂
<i>AMT-12 (fig. 23A)</i>						
Spec 1	0,57	0,08	2,55	95,38	1,42	0,00
Spec 2	0,52	0,01	2,32	95,21	1,53	0,41
Spec 3	0,24	0,08	2,20	95,46	1,45	0,57
Spec 4	1,20	0,00	3,88	92,98	1,72	0,22
Spec 5	0,24	0,07	1,93	95,83	1,93	0,00
Spec 6	0,55	0,06	2,00	95,71	1,67	0,00
Spec 7	0,53	0,07	2,35	94,79	1,73	0,53
Spec 8	0,97	0,11	2,15	95,20	1,55	0,02
Spec 9	0,52	0,05	2,82	94,81	1,61	0,19
Spec 10	0,25	0,03	1,49	96,28	1,95	0,00
Spec 11	0,55	0,14	2,57	94,76	1,98	0,00
Spec 12	0,70	0,10	2,46	95,43	1,31	0,02
<i>AMT-26 (fig. 23C)</i>						
Spec 1	0,52	0,29	1,44	95,65	1,59	0,50
Spec 2	0,30	0,23	0,75	97,22	1,11	0,40
Spec 3	0,25	0,35	0,91	96,73	1,22	0,54
Spec 4	0,87	0,27	2,11	94,83	1,32	0,60
Spec 5	0,27	0,26	0,77	97,24	1,30	0,16
Spec 6	0,16	0,29	0,75	97,45	1,19	0,15
Spec 7	0,15	0,38	0,78	96,83	1,50	0,37
Spec 8	0,19	0,27	0,79	96,42	1,81	0,52
Spec 9	0,20	0,24	0,82	96,09	1,94	0,72
Spec 10	0,64	0,31	2,54	94,31	1,56	0,63
Spec 11	0,88	0,27	3,47	93,38	1,56	0,45
<i>AMT-26 (fig. 23E)</i>						
Spec 1	0,17	0,04	0,34	97,89	1,13	0,43
Spec 2	1,10	0,04	2,87	94,41	1,58	0,00
Spec 3	0,38	0,08	0,40	97,48	1,67	0,00
Spec 4	0,63	0,02	1,16	96,32	1,87	0,00
Spec 5	0,45	0,17	0,53	97,40	1,43	0,02
Spec 6	0,57	0,08	0,90	96,95	1,51	0,00
Spec 7	0,83	0,06	2,11	95,25	1,74	0,00

ANEXO I – Dados químicos semiquantitativos (EDS) de cassiterita do ABGN.

Amostra	CASSITERITA					
	210	FeO	Y ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅	SnO ₂	Ta ₂ O ₅
Spec A1	1,05	0,05	4,54	93,01	1,16	0,20
Spec A2	0,70	0,06	2,26	95,78	1,20	0,00
Spec A3	0,74	0,08	3,64	93,63	1,91	0,00
Spec A4	0,60	0,07	2,06	95,94	1,18	0,15
Spec A5	1,14	0,00	4,86	92,39	1,62	0,00
Spec A6	0,22	0,06	2,08	96,28	0,86	0,50
Spec B1	0,87	0,00	3,74	93,77	1,61	0,00
Spec B2	0,56	0,04	2,28	95,69	1,43	0,00
Spec B3	0,55	0,07	2,21	95,82	1,36	0,00
Spec B4	0,14	0,17	1,51	96,43	1,75	0,00
Spec C1	0,69	0,01	3,68	94,09	1,53	0,00
Spec C2	0,91	0,01	4,49	92,87	1,72	0,00
Spec C3	0,78	0,00	3,48	94,29	1,45	0,00
Spec C4	0,92	0,00	5,01	92,26	1,81	0,00
Spec C5	1,01	0,11	4,39	92,48	2,02	0,00
Spec C6	0,15	0,09	1,51	96,92	1,08	0,24
Spec C7	0,23	0,11	1,84	96,62	1,20	0,00
Spec D1	0,95	0,01	3,46	93,96	1,61	0,00
Spec D2	0,56	0,02	2,63	95,26	1,53	0,00
Spec D3	0,97	0,00	4,05	92,99	1,99	0,00
Spec D4	0,85	0,01	3,64	93,53	1,97	0,00
Spec D5	0,95	0,05	3,59	93,87	1,54	0,00
Spec D6	1,01	0,00	4,59	92,78	1,61	0,00
Spec D7	0,63	0,06	2,41	95,74	1,16	0,00