



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geologia
Geologia Econômica e Prospecção

Dissertação de Mestrado

Geologia, controle estrutural e mineralogia do escarnito mineralizado em ouro e tungstênio da Mina Bonfim-II, Província Borborema, Rio Grande do Norte, Brasil.

Dissertação de Mestrado N° 474

Eduardo Henrique Rodrigues Pereira

Brasília – DF, Brasil

Maio de 2021



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Geologia
Geologia Econômica e Prospecção

Dissertação de Mestrado

Geologia, controle estrutural e mineralogia do escarnito mineralizado em ouro e tungstênio da Mina Bonfim-II, Província Borborema, Rio Grande do Norte, Brasil.

Dissertação de Mestrado N° 474

Eduardo Henrique Rodrigues Pereira

Orientador: Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho

Coorientador: Claudinei Gouveia de Oliveira

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Clovis Vaz Parente - UFC

Prof. Dr. Luis Gustavo Ferreira Viegas - UnB

Prof. Dr. Elton Luiz Dantas - UnB (Suplente)

Brasília – DF

2021



Universidade de Brasília

Dissertação de Mestrado

Geologia, controle estrutural e mineralogia do escarnito mineralizado em ouro e tungstênio da Mina Bonfim-II, Província Borborema, Rio Grande do Norte, Brasil.

Eduardo Henrique Rodrigues Pereira

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da UnB para obtenção do Título de Mestre em Geologia na Área de Concentração Geologia Econômica e Prospecção.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil CNPq, Processo 311203/2014-0.

Brasília – 2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

PP436g Pereira, Eduardo Henrique Rodrigues
Geologia, controle estrutural e mineralogia do escarnito mineralizado em ouro e tungstênio da Mina Bonfim-II, Província Borborema, Rio Grande do Norte, Brasil / Eduardo Henrique Rodrigues Pereira; orientador Nilson Francisquini Botelho; co-orientador Claudinei Gouveia Oliveira. -- Brasília, 2021.
37 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geologia) -- Universidade de Brasília, 2021.

1. Escarnito. 2. Mina Bonfim-II. 3. Ouro. 4. Tungstênio. 5. Mineralização. I. Botelho, Nilson Francisquini, orient. II. Oliveira, Claudinei Gouveia, co-orient. III. Título.

Agradecimentos

À minha mãe Maria da Conceição Rodrigues Pereira e meu pai Eduardo Alves Pereira pelo apoio e incentivo aos meus estudos, que me levaram ao título de geólogo, e que agora me leva um passo adiante, para a conquista do título de mestre em geologia na pós-graduação.

À minha esposa Alini F. Tschope Pereira e filha Bárbara T. Pereira, pela compreensão durante os finais de semana em que tive que me dedicar ao mestrado, ausentando-me de momentos em família.

Ao meu orientador Professor Dr. Nilson Francisquini Botelho, por contribuir com o meu conhecimento geológico, notadamente na área de mineralogia e minerografia, e no total apoio para realização das análises de microsonda eletrônica. Gratidão eterna por compartilhar sua sabedoria, e me orientar nesta trajetória.

Ao coorientador Professor Dr. Claudinei Gouveia de Oliveira, pelas discussões tanto dentro da mina Bonfim-II, quanto em seus arredores.

Ao Professor Elton Dantas por contribuições sobre a geologia do Rio Grande do Norte.

À Mineradora Nosso Senhor do Bonfim Ltda., na figura do diretor presidente Luis Antônio Vessani, por autorizar a realização do mestrado na Mina Bonfim-II.

À técnica de mineração Danielle Rodrigues que trabalhava comigo e ajudava nos trabalhos de mina, e banco de dados, e que também contribuiu com figuras para o projeto de mestrado.

Ao geólogo Ricardo Lívio Marques pelas primeiras análises de microsonda eletrônica em amostras da Mina Bonfim-II.

Aos geólogos Lucas Anjos, Francisco Fernandes da Costa e Moacir Eugênio Bezerra, que também trabalharam comigo na mina e ajudaram a fazer o mapeamento de trechos das galerias subterrâneas. Ao estagiário Eduardo Valentim, pelas análises químicas de microsonda eletrônica.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, que me possibilitou obter o conhecimento geológico.

Ao geólogo Fernando Latorraca (in memoriam), que na época era o gerente da Mina Bonfim e me incentivou a fazer o mestrado.

Ao geólogo Luiz Neto (in memoriam), que me passou os conhecimentos geológicos da Mina Bonfim-I.

À Deus que permitiu a realização deste momento.

Resumo

O corpo de minério da Mina Bonfim-II é constituído por escarnito mineralizado em tungstênio e ouro, disposto como uma camada estratiforme na base do pacote de mármore, em contato concordante com flogopita xistos da Formação Jucurutu, base do Grupo Seridó. A estruturação em Bonfim encontra-se segundo o *trend* de direção NNE, ao longo do qual existem três depósitos de minério que são Bonfim-I, Bonfim-II e Bonfim-III, que compõem o Sistema Estrutural Bonfim (SEB).

O escarnito exhibe zonação vertical, que marca o contato superior com tremolita-flogopita mármore, a zona do diopsídio (zona central) mineralizada em scheelita e molibdenita, produto de alteração e substituição de mármore dolomítico, e a zona da zoizita-clinozoizita (zona inferior), com clorita, epidoto e sericita provenientes do hidrotermalismo em flogopita xistos, que exhibe fraturas preenchidas por ouro e bismuto. O corpo de minério escarnítico encontra-se segundo a direção N10°E/30°SE, deformado por cisalhamento em condições dúcteis, assumindo a forma de boudins, cujo eixo de maior alongamento possui caimento de 12° para NNE. A scheelita ocorre sob a forma de boudins, associada à molibdenita. Tais condições mostram que a mineralização de tungstênio é sintectônica, e consiste na primeira fase de mineralização, sistema W-Mo.

O ouro ocorre associado aos minerais de bismuto e telúrio, preenchendo falhas e fraturas de cisalhamento com atitude N70°W/75°SW, seccionando e deslocando o bandamento do escarnito de direção N10°E/30°SE. Tais feições estruturais evidenciam que o ouro pertence a uma segunda fase de mineralização, o sistema Au-Bi-Te, formado em condições rúpteis na crosta. As fraturas auríferas normalmente são verticalizadas e espaçadas entre si, ocorrendo como veios estreitos sob a forma de *sheeted veins*.

Dados geocronológicos evidenciam que o pico do metamorfismo no ciclo Brasileiro teria ocorrido por volta de 600 Ma, e a granitogênese a partir de $577 \pm 4,5$ Ma, com base em dados U-Pb. Em Bonfim foram obtidas datações Re/Os em molibdenita de 524 ± 2 Ma, indicando que está seja a idade para a 1ª fase de mineralização em Bonfim. Admite-se que as estruturas que controlam a 2ª fase de mineralização estejam relacionadas às intrusões pegmatíticas tardi-brasilianas, que marcam o estágio final do magmatismo. Datações U-Pb em tantalita de pegmatitos revelam idades de $514 \pm 1,1$ Ma para a fase tardia da orogenia, correlacionadas ao sistema Au+Bi+Te. Considera-se que os pegmatitos sejam a fonte de fluidos hidrotermais da mineralização aurífera.

A minerografia mostra que a paragênese aurífera é composta por bismuto, bismutinita, joseíta (Bi_4TeS_2), calcopirita, hedleyita (Bi_7Te_3) e gersdorffita (NiAsS), sendo os dois últimos inéditos. As principais formas de ocorrência do ouro são: livre na ganga, em contato com bismuto, bismutinita e joseíta, ou em fraturas. A ganga das fraturas é composta por prehnita, indicando que a precipitação do ouro teria ocorrido na fácies metamórfica prehnita-pumpellyita.

Descrições petrográficas mostram que o diopsídio é o mineral predominante, tendo ainda actinolita, tremolita, calcita, clorita, muscovita, plagioclásio reliquiar, feldspato potássico (KF) e acessórios como titanita, apatita e allanita. Houve intenso processo de alteração dos feldspatos gerando sericita, carbonato, epidoto e zoizita-clinozoizita. Além disso, permitiram identificar uma granada rica em cromo, que ainda não havia sido identificada em Bonfim. Análises de microsonda eletrônica indicam elevados teores em prata, até 16,09%Ag na composição do ouro, e ainda bismuto e telúrio que podem alcançar até 0,44%Bi, e 0,16% Te.

O escarnito Bonfim é um exoescarnito, cálcico, reduzido e distal, formado por meio de fluidos hidrotermais migrados por zonas de cisalhamento, e/ou superfícies de contato.

Abstract

The ore body of Mina Bonfim-II consists of mineralized gold tungsten skarn as a stratiform layer at the base of the marble package in concordant contact with phlogopite schists from the Jucurutu Formation, base of the Seridó Group. The structure in Bonfim follows the NNE trend along which there are three ore deposits: Bonfim-I, Bonfim-II and Bonfim-III, which make up the Bonfim Structural System (SEB).

The skarn shows a vertical zonation which marks the upper contact with tremolite-phlogopite marbles, the diopside zone (central zone) is mineralized in scheelite and molybdenite as a product of alteration and replacement of dolomitic marble and the zoizite-clinozoizite zone (lower zone) with chlorite, epidote and sericite from hydrothermalism in phlogopite schists, which exhibit fractures filled with gold and bismuth.

The skarn ore body strikes about N10°E and dip 30° to the SE deformed by shear zone under ductile conditions, assuming the form of boudins whose longer axis plunge 12° towards N10°E. Scheelite occurs as boudins associated with molybdenite. Such conditions show that tungsten mineralization is syntectonic and consists of the first phase of mineralization, the W-Mo system.

Gold occurs associated with bismuth and tellurium minerals filling faults and shear fractures that strike about N70°W and dip 75° to the SW, sectioning and displacing the skarn banding in the strike N10°E and dip 30° to the SE direction. Such structural features evidence that gold belongs to a second phase of mineralization the Au-Bi-Te system, formed under brittle conditions in the crust. Gold fractures are usually vertical and spaced apart occurring as narrow veins in the form of sheeted veins.

Geochronological data shows that the peak of metamorphism in the Brasiliano cycle would have occurred around 600 Ma, and granitogenesis from 577 ± 4.5 Ma based on U-Pb data. At Bonfim Re/Os datings on molybdenite of 524 ± 2 Ma were obtained indicating that this is the age of the 1st phase of mineralization at Bonfim. It is assumed because the structures that control the 2nd phase of mineralization are related to late Brazilian pegmatitic intrusions, which mark the final stage of magmatism. U-Pb dating in tantalite of pegmatites reveals ages of 514 ± 1.1 Ma for the late phase of the orogeny, correlated to the Au+Bi+Te system. Pegmatites are considered to be the source of hydrothermal fluids for gold mineralization.

The minerography shows that the gold paragenesis is composed of bismuth, bismutinite, joseite (Bi₄TeS₂), chalcopyrite, hedleyite (Bi₇Te₃) and gersdorffite (NiAsS), the last two never been published. The main forms of gold occurrence are: free in the gangue, in contact with bismuth, bismutinite and joseite, or in fractures. The gangue of the fractures is composed of prehnite, indicating that the gold precipitation would have occurred in the prehnite-pumpellyite metamorphic facies.

Petrographic descriptions show that diopside is the predominant mineral, with actinolite, tremolite, calcite, chlorite, muscovite, plagioclase relic, k-feldspar and accessories such as titanite, apatite and allanite. There was an intense process of alteration of the feldspars, generating sericite, carbonate, epidote and zoisite-clinozoisite. Furthermore, allowed to identify a chromium-rich garnet which had not yet been identified in Bonfim. Electron microprobe analyzes indicate high levels of silver up to 16.09% Ag in the composition of gold, and even bismuth and tellurium, which can reach up to 0.44% Bi, and 0.16% Te.

Bonfim skarn is an exoskarn, calcic, reduced and distal, formed by means of hydrothermal fluids migrated by shear zones and/or contact surfaces.

Sumário

| | |
|---|---|
| Capítulo I | 1 |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Apresentação | 1 |
| 1.2. Justificativas e objetivos | 1 |
| 1.3. Localização da área de estudo | 2 |
| 1.4. Materiais e Métodos | 3 |
| 1.5. O Estrato Bonfim e o escarnito mineralizado | 4 |
| 2. REFERÊNCIAS..... | 5 |
| | |
| Capítulo II..... | 6 |
| 1. Artigo publicado: Geologia, controle estrutural e mineralogia do escarnito mineralizado em ouro e tungstênio da Mina Bonfim-II, Província Borborema, Rio Grande do Norte, Brasil | |

Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, v. 19, n. 4, p. 9-120, Dezembro 2019.
DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v19-151883

Lista de Figuras

Capítulo I

Figura 1 – Localização da área do Projeto Bonfim, a oeste de Natal, capital do Rio Grande do Norte.

Capítulo II

Figura 1- Quadro Geológico Regional da porção setentrional da Província Borborema, destacando os vários domínios. A região deste trabalho situa-se no domínio Rio Piranhas Seridó (Complexo Caicó), incluindo o Grupo Seridó, representado por rochas metassedimentares, além dos granitos granitoides brasileiros individualizados na Suíte Ígnea Brasileira. Destaca-se a área da folha geológica Lajes, na qual está inserido o depósito Bonfim.

Figura 2- Mapa geológico regional da Província Borborema, destacando as distintas unidades litoestratigráficas presentes, desde o embasamento arqueano a paleoproterozoico aos granitos brasileiros. Encontra-se ainda a localização dos principais depósitos de scheelita e ouro, com ênfase ao depósito Bonfim na área de trabalho.

Figura 3. Mapa Geológico na região da Mina Bonfim-II em escala 1:5.000. Destaca-se as falhas e fraturas de direção NW que correspondem às estruturas tardias que controlam a mineralização aurífera.

Figura 4. Escarnito com orientação N10°E/30°SE, mostrando a zona central máfica mineralizada em scheelita e molibdenita, deslocada por falha de direção NW-SE, que faz parte da família de fraturas subverticais com atitude N50°W/55°SW, preenchidas por minerais de bismuto associados à mineralização aurífera, presentes na zona inferior do escarnito. Frente de lavra no nível 215 norte da Mina Bonfim-II.

Figura 5. Seção longitudinal do corpo de minério Bonfim-II, modelado no *software* Surpac (Gemcom) com base no banco de dados de sondagem e em informações de mapeamento estrutural, mostrando a forma de um grande boudin disposto segundo a direção NNE, com plunge de baixo ângulo ao longo de sua direção. Corpo de minério com as escavações dos níveis superiores da mina subterrânea abertos.

Figura 6. Mapa geológico-estrutural da Mina Bonfim-II no nível 215, mostrando falhas e fraturas com orientação predominante segundo a direção NW, que correspondem às estruturas mineralizadas em ouro, bismuto e telúrio na mina subterrânea (escala 1:1.000).

Figura 7. Mapa geológico de detalhe do boudin de mármore branco mapeado na entrada do nível 188. Destaca-se as estruturas, falhas e fraturas de direção NW, que controlam a mineralização aurífera.

Figura 8. Feições geológicas e estruturas da Mina. (A) Mármore bandados acima do escarnito. (B) Escarnito no contato entre tremolita-flogopita mármores e flogopita xistos na base. (C) Boudins de mármore dolomítico dentro da camada do escarnito. (D) Boudin de mármore dolomítico seccionado por fraturas com minerais de bismuto dentro do escarnito. (E) Camada de escarnito com boudins de scheelita. (F) Boudins de scheelita vistos com luz ultravioleta. (G) Fraturas preenchidas por minerais de bismuto preto. (H) Falha de direção NW preenchida por minerais de bismuto com terminação em *splay* na parte inferior.

Figura 9. Fotomicrografias de amostras de escarnitos da mina Bonfim-II. (A) Granada cromífera cor verde, N// - 40X. (B) Lamelas de Prehnita, NX - 100X. (C) Ouro livre na ganga. (D) Ouro em contato com bismuto, 400X. (E) Ouro em contato com bismuto e bismutinita, 400X. (F) Bismutinita com bismuto nas bordas, 100X (G) Ouro em contato com joseíta, 200X. (H) Joseíta associada com bismuto – MEV.

Figura 10. Seção longitudinal (direção N-S), mostrando os depósitos Bonfim-I, Bonfim-II e Bonfim-III ao longo do trend estrutural NNE, que forma o Sistema Estrutural Bonfim (SEB).

Figura 11. Seção geológica interpretada com base em sondagem e mapeamento de galerias da Mina Bonfim-II e também afloramentos em superfície. Perfil mostrando o comportamento dos escarnitos em profundidade e a possível influência do pegmatito na mineralização.

Lista de Tabelas

Capítulo I

Tabela 1 - Classificação de calcários/mármoreos conforme limites estabelecidos pela Embrapa (2006).

Tabela 2. Resultados das análises de mármoreos da Mina Bonfim-II.

Capítulo II

Tabela 01. Resultados das análises químicas de microsonda eletrônica em grãos de ouro do escarnito. Nota: nc = não calculado, na= não analisado.

Tabela 02. Resultados de análises químicas de testemunhos de sondagem de escarnitos.

Tabela 03. Tabela dos minerais metálicos analisados em amostras de escarnitos (corpo b) da Mina Bonfim-II. *na (não analisado) **nc (não calculado).

Tabela 04. Tabela dos minerais não-metálicos analisados por microsonda eletrônica em amostras de escarnitos (corpo b) da Mina Bonfim-II. *na (não analisado) **nc (não calculado).

Capítulo I

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

A presente dissertação está dividida em dois capítulos, sendo que no primeiro são abordados aspectos gerais, justificativa do projeto e objetivos, e o segundo corresponde ao artigo publicado.

O tema principal da dissertação corresponde à geologia do corpo de minério escarnítico, sua mineralogia, a paragênese aurífera, e o controle estrutural. A caracterização do ouro mostra íntima associação com bismuto, incluindo sulfetos e teluretos de bismuto.

A Mina Bonfim está situada 25 km a sudeste da cidade de Lajes-RN (Figura 1), compreende a mina antiga, Mina Bonfim-I, que corresponde à mina que foi lavrada desde 1969, inicialmente por garimpeiros, devido à facilidade de extração, uma vez que o minério estava aflorante, e a Mina Bonfim-II, que se encontra espacialmente afastada 1 km ao longo do *trend* NNE, cujo minério não aflorava. Por outro lado, o corpo de minério da mina antiga além de aflorar, em subsuperfície era raso chegando a 75m de profundidade, ao passo que na mina nova (Bonfim-II), o escarnito encontra-se 90m abaixo da superfície, chegando até 150m de profundidade, de modo que a mina nova só foi aberta em 2013, através de uma rampa de acesso, a partir da qual foram planejados e abertos os níveis de produção.

Deste modo, raros trabalhos presentes na literatura possuem alguma informação sobre o depósito Bonfim-II, e praticamente todas as publicações científicas existentes sobre Bonfim, antes deste trabalho, tratam apenas da Mina Bonfim-I. Além de Bonfim-I, e Bonfim-II, existe ainda um depósito de tungstênio e ouro que segue o mesmo *trend* estrutural NNE, estando a 400m de profundidade, que é o depósito Bonfim-III, que exhibe o mesmo *plunge* estrutural, formando o Sistema Estrutural Bonfim (SEB), contudo até o momento não possui sondagem suficiente para um estudo de viabilidade econômica com vistas à abertura de uma nova mina subterrânea.

1.2. Justificativas e objetivos

Na região do Seridó já foram relatadas mais de 500 ocorrências de escarnitos de tungstênio (scheelitíferos), ou tactitos como são comumente relatados, que vieram sendo descobertos desde o início da década de 40, contudo apenas Bonfim possui ouro além de scheelita, por isso se encontra em posição de destaque em relação a centenas de outros depósitos e/ou ocorrências no âmbito da Província Borborema.

O minério é uma rocha calcissilicática, de coloração esverdeada, constituída por diopsídio, anfibólio, quartzo, calcita, e às vezes pirita, molibdenita, epidoto e rodonita, conforme descrito em um dos primeiros trabalhos técnicos de geologia em Bonfim, relacionado à sondagem executada pela CPRM (1971).

O depósito Bonfim hospeda-se num nível conhecido por “Horizonte Bonfim”, em uma sequência constituída por biotita gnaisse com intercalações de quartzitos, mármore, e calcissilicatadas, tendo no topo biotita xistos granadíferos, de modo que esta sequência compõe a macroestrutura sinformal de Bonfim, que possui eixo 10°/NNE ou SSW

(Salim, 1979). Além da tectônica dúctil, encontra-se uma zona cataclástica, representada por intenso diaclasamento, brechação, quebramento e estiramento de minerais, com silicificação e formação secundária de sericita, clorita e epidoto. Esta zona está relacionada a um falhamento longitudinal, que acompanha a direção da foliação regional N20°E (Salim, 1979).

Em geral, os escarnitos de tungstênio do Seridó consistem em níveis ou camadas, apresentando estrutura bandada e granulação fina à média, mas também podem ser isotrópicos com granulação grossa, de modo que, a assembleia mineralógica destes escarnitos/tactitos consiste predominantemente de epidoto, granada do tipo andradita ou grossulária, quartzo, calcita, por vezes diopsídio, e scheelita, tendo ainda pirita como principal sulfeto, e calcopirita subordinada, o que permite classifica-los como escarnitos de tungstênio oxidados (Einaudi et al., 1981).

Os escarnitos mineralizados em Bonfim apresentam o estágio progressivo constituído por almadina, diopsídio, anortita e actinolita-magnésio-hornblenda, e retrogressivo caracterizado por feldspato alcalino, clinozoisita-zoisita-sericita, calcita e quartzo. O sulfeto predominante é a pirrotita, tendo ainda granada almandina e espersatita, além de altos teores em ouro, sendo que tais características permitem classifica-los como escarnitos formados em ambiente redutor (Souza Neto, 2008).

O ouro está associado com minerais de bismuto e telúrio, que ocorrem como minerais de granulação fina e cor preta preenchendo falhas conjugadas dúcteis-rúpteis e fraturas extensionais, cortando ambos os estágios, progressivo e retrogressivo, que fazem parte de um estágio tardio do escarnito em Bonfim (Souza Neto, 2008).

Datação usando o método Re/Os em molibdenitas de Bonfim indica idade de 524 ± 2 Ma para a mineralização de W-Mo do depósito (Hollanda et al., 2017). Amostras de zircões do granito Bonfim foram inadequadas para determinações de idade U-Pb.

Considerando que praticamente não existem trabalhos científicos a respeito do escarnito mineralizado em ouro, bismuto, telúrio, molibdênio e tungstênio (scheelita), presente na mina Bonfim-II, este trabalho foi proposto a fim de trazer conhecimento sobre o minério exposto nas escavações da nova mina subterrânea, o que permite ainda fazer comparações com os dados existentes na literatura sobre Bonfim.

Os trabalhos de mapeamento geológico da mina, juntamente com os estudos de caracterização químico-mineralógica do escarnito de Bonfim-II, com ênfase na mineralização aurífera e sua associação paragenética, através de petrografia, minerografia e análises químicas, aliados ao controle estrutural do corpo de minério escarnítico, correspondem aos objetivos principais da dissertação.

O termo “camada máfica” utilizado para o escarnito, é apenas descritivo e refere-se a uma camada de cor preta, semelhante à escura, ou seja, melanocrática, não tendo nenhuma relação com rochas ígneas máficas de magmatismo básico.

Desde a década de 40 os depósitos de scheelita eram classificados como tactitos, deste modo, torna-se relevante a caracterização do minério em Bonfim-II, no sentido de reforçar o modelo metalogenético de Bonfim como do tipo escarnítico.

1.3. Localização da área de estudo

A área do projeto de mestrado (Figura 1), onde se situa a Mina Bonfim-II, faz parte do município de Lajes-RN, distante 120km da capital do Estado, cujo trajeto partindo de Natal-RN, é feito pela rodovia federal BR-304 até o Km 213, onde tem a entrada de acesso para a Mina Bonfim, seguindo em estrada de terra por 15 Km para Sul.



Figura 1 – Localização da área do Projeto Bonfim, a oeste de Natal, capital do Rio Grande do Norte.

1.4. Materiais e Métodos

As metodologias empregadas no trabalho foram:

- Estudo da bibliografia geológica regional da Província Borborema, dos trabalhos sobre o Seridó e as mineralizações de scheelita, além dos trabalhos existentes acerca da Mina Bonfim e região.
- Mapeamento geológico-estrutural sistemático das galerias em desenvolvimento e das câmaras de lavra dentro da mina subterrânea, o que permitiu elaborar o mapa dos níveis de produção de minério. Mapas feitos em Arcgis.
- Coleta de amostras do escarnito mineralizado durante o mapeamento, em diferentes níveis e em regiões distintas do corpo de minério, na parte máfica central, nas porções ricas em vênulas de bismuto e ouro, partes ricas em molibdenita, e porções com teluretos e sulfetos.
- Descrição petrográfica de lâminas delgadas com microscópio de luz transmitida, e descrição minerográfica de lâminas delgadas polidas e seções polidas em microscópio de luz refletida, no laboratório de microscopia da UnB.
- As análises químicas dos minerais foram feitas na microsonda eletrônica (*Electron Probe Micro Analyser* — EPMA) Jeol Modelo Superprobe JXA-8230, com microscópio eletrônico de varredura (MEV), do laboratório de microsonda eletrônica da Universidade de Brasília, por meio do método de dispersão por energia (EDS) e por comprimento de ondas (WDS). As condições analíticas utilizadas foram 20 KV de voltagem de aceleração e 20 nA de feixe de corrente, com tempo de contagem para todos elementos no pico e *background* de 5 e 10 s.
- Análises químicas em testemunhos de sondagem foram feitas no laboratório da Mineradora Nosso Senhor do Bonfim, e também no laboratório SGS Geosol. Método analítico por Raio-X, XRF79C: Fusão com tetraborato de lítio e quantificação por XRF. Perda ao fogo LOI, PHY01E: Perda ao fogo por calcinação da amostra a 405°C e/ou 1000°C.

Os resultados analíticos foram tratados e integrados com a petrografia, a minerografia e a geologia da mina, possibilitando gerar as devidas conclusões acerca do minério do depósito Bonfim, os quais serão apresentados nesta dissertação sob a forma de artigo

publicado na Revista do Instituto de Geociências da USP, série científica, volume 19, número 4, de dezembro de 2019, e na defesa do mestrado na Universidade de Brasília.

1.5. O Estrato Bonfim e o escarnito mineralizado

O Estrato Bonfim compreende uma unidade de rochas calcárias metamorfisadas, representadas por mármore bandados, que formam um pacote com espessura média em torno de 20m, dispostos de forma intercalada, segundo a direção N10°E com mergulho médio de 30° para SE.

Considerando que a Mina Bonfim é um depósito de ouro e tungstênio do tipo escarnítico (*tipo skarn*), a presença de rochas carbonáticas é um fator necessário para sua gênese, além da fonte de fluidos metamórficos e/ou metassomáticos, que pode ser distal ou proximal.

O escarnito hospedeiro das mineralizações de ouro e tungstênio, incluindo ainda bismuto, telúrio e molibdênio, descrito como corpo de minério neste trabalho, ocorre na Mina Bonfim como uma camada estratiforme associada com mármore branco, presente na interface de contato concordante entre tremolita-flogopita mármore e flogopita xistos da unidade basal.

A classificação dos mármore da Mina Bonfim foi feita com base nos intervalos de teores de %CaO e %MgO (Primavesi, 2004) conforme consta na tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de calcários/mármore conforme limites estabelecidos pela Embrapa (2004).

| Classificação | MgO | CaO |
|---------------|-----------|-----------|
| Calcítico | 1% - 5% | 45% - 55% |
| Magnésiano | 5% - 12% | 40% - 42% |
| Dolomítico | 13% - 21% | 25% - 35% |

Considerando a importância dos mármore no processo de formação dos escarnitos, foram feitas análises químicas para classificar os três tipos principais de mármore do Estrato Bonfim, o mármore branco cristalino, o mármore de cor salmão e o tremolita-flogopita mármore, de cor marrom claro (tabela 2). Considerando o teor de MgO obtido para o mármore branco cristalino, este pode ser classificado como mármore dolomítico. Deste modo, o escarnito corresponde ao produto de alteração e substituição da camada de mármore branco dolomítico, por meio de processos metassomáticos envolvendo fluidos hidrotermais que percolaram por meio de estruturas pré-existentes. O mármore branco ocorre tanto abaixo quanto acima da camada de escarnito, e também dentro do corpo de minério, como porções remanescentes dos mármore que não foram escarnitizados, os quais se encontram sob a forma de boudins.

Tabela 2. Resultados das análises de mármore da Mina Bonfim-II. (Laboratório SGS Geosol, Certificado de Análises GQ1602832. Tipos de amostras: SMP=Amostra Simples, REP=Replicata, STD=Padrão do laboratório)

| Amostra Id # | SiO ₂ % | Al ₂ O ₃ % | Fe ₂ O ₃ % | CaO % | MgO % | TiO ₂ % | P ₂ O ₅ % | Na ₂ O % | K ₂ O % | MnO % | LOI % | Mármore s |
|--------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|-------|--------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|-------|-------|------------|
| MBF-05 | 7,29 | 0,66 | 0,37 | 34,00 | 18,10 | 0,04 | 0,04 | 0,09 | 0,07 | 0,03 | 40,23 | SMP Branco |
| MBF-06 | 2,65 | 0,64 | 0,31 | 53,00 | 0,51 | 0,04 | 0,10 | 0,09 | 0,18 | 0,00 | 42,07 | Salmão |
| MBF-07 | 26,0 | 5,63 | 2,93 | 25,90 | 15,70 | 0,28 | 0,33 | 0,13 | 2,30 | 0,09 | 22,32 | Marrom |
| MBF-05 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 40,48 | REP Branco |
| SG_079 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 6,15 | STD |
| IPT122 | 4,50 | 1,26 | 0,63 | 32,00 | 17,50 | 0,06 | 0,05 | 0,09 | 0,45 | 0,04 | - | STD |

2. REFERÊNCIAS

Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. (1971). Relatório Final, Projeto Bonfim, CPRM, Agência Recife.

Einaudi, M.T., Meinert, L.D., Newberry, R.J. (1981). Skarn deposits. *Economic Geology*, 75th Anniversary, Volume; 317-391.

Hollanda, M.H.B.M., Souza Neto, J.A., Archanjo, C.J., Stein, H., Maia, A.C.S. (2017). Age of the granitic magmatism and the W-Mo mineralizations in skarns of the Seridó belt (NE Brazil) based on zircon U-Pb (SHRIMP) and Re-Os determinations. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.07.11>

Primavesi, A.C., Primavesi, O. (2004). Características de corretivos agrícolas. Embrapa, Pecuária Sudeste, Documentos, 37, 28p. ISSN 1518-4757

Salim, J. (1979). Geologia e controles das mineralizações scheelitíferas da região da Serra do Feiticeiro e Bonfim/Lajes. Rio Grande do Norte-Brasil. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Souza Neto, J.A., Legrand, J.M., Volfinger, M., Pascal, M.L., Sonnet, P. (2008). W-Au skarns in the Neo-Proterozoic Seridó Mobile Belt, Borborema Province in northeastern Brazil: an overview with emphasis on the Bonfim deposit. *Mineralium Deposita*, 43(2), 185-205. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0155-1>

Geologia, controle estrutural e mineralogia do escarnito mineralizado em ouro e tungstênio da Mina Bonfim-II, Província Borborema, Rio Grande do Norte, Brasil

Geology, structural control and mineralogy of gold and tungsten mineralized skarn at Bonfim Mine, Borborema Province, Rio Grande do Norte, Brazil.

Eduardo Henrique Rodrigues Pereira¹ , Nilson Francisquini Botelho¹ ,
Claudinei Gouveia de Oliveira¹ , Eduardo Valentin dos Santos¹ 

¹Universidade de Brasília - UnB, Instituto de Geociências, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, CEP 70910-900, Brasília, DF, BR. (eduhenrique975@gmail.com; nilsonfb@unb.br; gouveia@unb.br; eduardovalentindossantos@gmail.com)

Recebido em 18 de novembro de 2018; aceito em 11 de setembro de 2019

Resumo

A Mina Bonfim é caracterizada por camadas de mármore em contato com flogopita xistos subjacentes, ao longo do qual se desenvolveu o escarnito rico em tungstênio e ouro, disposto seguindo a orientação N10°E/30°SE, cisalhado e estruturado sob a forma de boudins, em baixo ângulo de caimento (12°) ao longo da direção N10°E. A scheelita encontra-se nos boudins, associando-se à molibdenita, ambas sendo formadas sob condições sin-tectônicas dúcteis, consistindo na primeira fase de mineralização. O ouro encontra-se em fraturas de cisalhamento tardias, com orientação N70°W/75°SW, que seccionam e deslocam o escarnito scheelitífero. As fraturas são preenchidas por prehnita (ganga), ouro e minerais de bismuto, indicando que a precipitação do ouro ocorreu na fácies prehnita-pumpellyita, sob regime dúctil-rúptil, que corresponde à segunda fase de mineralização. O ouro é rico em prata com até 16,09%Ag, e suas formas de ocorrência são: livre na ganga, em fraturas ou em contato com bismuto, bismutinita e joseíta, constituindo a paragênese aurífera. Grãos de ouro exibem bismuto na composição, podendo chegar a 0,44%Bi. O minério está hospedado em escarnito reduzido, gerado em estágios progressivo e retrogressivo, produto do metassomatismo em mármore alterados por fluidos carregados ao longo de estruturas.

Palavras-chave: Escarnito; Bonfim; Scheelita; Ouro; Fraturas; Prehnita.

Abstract

The Bonfim Mine is characterized by marbles layers in contact with underlying phlogopite schists, along which gold- and tungsten-rich skarns were developed, in N10°E/30°SE direction, sheared and structured as boudins plunging 12° to N10°E. Scheelite is found in the boudins, associated to molybdenite, both being formed under ductile syntectonic conditions, consisting of the first phase of mineralization. Gold is found in late shear fractures, oriented N70°W/75°SW, that cut and displace the scheelitiferous skarn. The fractures are filled by prehnite (gangue), gold and bismuth minerals, indicating that gold precipitation occurred in the prehnite-pumpellyite facies under ductile-brittle regime, which corresponds to the 2nd phase of mineralization. The gold is rich in silver with up to 16.09%Ag and its occurrences are: free in gangue, in fractures and in contact with bismuth, bismuthinite and joséite, constituting auriferous paragenesis. Gold grains show bismuth in its microprobe analyses composition, reaching up to 0.44%Bi. The ore is hosted in a reduced skarn, generated in progressive and retrogressive stages, the product of metasomatism in marbles altered by fluids carried along the structures.

Keywords: Skarn; Bonfim; Scheelite; Gold; Fractures; Prehnite.

INTRODUÇÃO

A scheelita de Bonfim foi descoberta em 1969 por Eurico Pereira, filho de Raul Pereira da Silva (Raul Capitão), dono da Fazenda Bonfim, a sudeste da cidade de Lajes, Rio Grande do Norte, Brasil, extraída inicialmente sob a forma de garimpo. Entre 1970 e 1971, a Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM, 1971) executou duas campanhas de sondagem rotativa diamantada nas áreas de Bonfim-I e Bonfim-II, totalizando 2.887,92 m distribuídos em 24 furos, o que permitiu a compreensão da geologia e do comportamento dos corpos de minério, possibilitando a lavra subterrânea até o início dos anos 1980, quando houve a queda no preço internacional do tungstênio.

A existência de ouro em Bonfim ficou conhecida apenas a partir de 1992, quando Antônio Cassiano Lopes da Silva, prospector do Seridó, identificou minúsculas pintas de ouro em bateia no riacho das nuvens (relatos verbais de Eurico Pereira e Antônio Cassiano).

A notícia de ouro na década de 1990 atraiu mineradoras de grande porte, tendo em vista o potencial para a existência de um depósito de classe mundial, entre as quais se destacam a Docegeo, a Rio Tinto Desenvolvimento Mineral (RTDM-RTZ) e a São Bento Mineração Ltda., que fizeram trabalhos prospectivos para ouro. Contudo, os resultados não indicaram grande potencial econômico.

Bonfim encontra-se disposto de modo concordante com as extensas zonas de cisalhamento de direção NNE-SSW que caracterizam o arcabouço estrutural da parte nordeste da Província Borborema (Figura 1), que corresponde ao *trend* da Formação Seridó, composta de biotita xistos metamorfisados e deformados durante o último evento orogênico, o Brasileiro, que afetou a região há 600 Ma (Van Schmus et al., 2003).

Intercalações de mármore bandados de composição calcítica, dolomítica e silicosa, dispostos segundo a direção N10°E, com baixo ângulo de mergulho (20 a 30°) para SE, compõem o pacote carbonático conhecido como Horizonte Bonfim (Docegeo, 1996), em cuja base se desenvolveu uma camada de escarnito em contato concordante e gradacional com flogopita xistos subjacentes, que corresponde ao corpo principal de minério da Mina Bonfim-II, o Corpo B.

A unidade de flogopita xistos é formada por xistos, por vezes com porfiroblastos de granada, exibindo sulfetação fina disseminada ou em bolsões milimétricos, com predomínio de pirrotita, tendo calcopirita subordinada. Isso sugere um ambiente de formação em condições redutoras (Souza Neto et al., 2008).

Em Bonfim-II, existem ainda os corpos de minério A e C, o primeiro no contato de topo do pacote de mármore com os xistos sobrepostos (Xisto Seridó), e o Corpo C posicionado 2 m abaixo do Corpo B, dentro da unidade de flogopita xistos, porém ambos com menor importância econômica.

O Corpo A não foi lavrado porque é muito estreito (10 cm) e o Corpo C foi lavrado em parte, contudo o baixo teor de ouro inviabilizou a sua extração.

Na região de Bonfim, existem duas minas subterrâneas: Bonfim-I, a mais antiga, tendo sido lavrada desde 1969, e que corresponde à mina onde se concentram todos os trabalhos existentes sobre Bonfim; e Bonfim-II, a mais recente, situada 1 km a nordeste, no *trend* estrutural NNE-SSW. Além disso, existe ainda um terceiro depósito, Bonfim-III, situado 500 m a nordeste de Bonfim-II, conhecido apenas por sondagem a 400 m de profundidade. Desse modo, os depósitos de Bonfim, dispostos ao longo do *trend* estrutural NNE, foram definidos neste trabalho como o Sistema Estrutural Bonfim (SEB), correspondendo aos três depósitos de minério escarnítico dispostos sob a forma de boudins com plunge de baixo ângulo (12°) para NNE. Portanto, o SEB mostra que ainda existe potencial exploratório para a descoberta de novos depósitos de minério de ouro e tungstênio na região de Bonfim.

GEOLOGIA REGIONAL

A Província Borborema corresponde a uma sequência supracrustal proterozoica composta de rochas sedimentares e vulcânicas metamorfisadas que repousam sobre embasamento gnáissico migmatítico, sendo que todas as unidades litológicas estão cortadas por intrusões graníticas brasileiras (Almeida et al., 1977). O conjunto das unidades litoestratigráficas caracterizam o cinturão orogênico compartimentado tectonicamente em domínios (Almeida et al., 1981), que no estado do Rio Grande do Norte são subdivididos em domínio São José do Campestre, na parte leste, domínio Rio Piranhas-Seridó, no centro do estado, e domínio Jaguaribeano, no extremo oeste (Angelim et al., 2006).

A Mina Bonfim está situada no extremo nordeste da Província Borborema, no domínio Rio Piranhas-Seridó, em rochas sedimentares metamorfisadas em fácies anfíbolito que compõem o Grupo Seridó (Figura 1), este repousando sobre ortognaisses do Complexo Caicó (Jardim de Sá, 1984), que compõem o embasamento gnáissico. Parte dos ortognaisses foram classificados em granitos G1 e G2 por Jardim de Sá (1994), e que apresentam idades riacianas (Hollanda et al., 2011; Medeiros et al., 2012). Foram diferenciados do Complexo Caicó, gnaisses e migmatitos de composição granodiorítica a tonalítica, de idade Sideriana (2.46 Ga), que compreendem o Complexo Arábia (Costa e Dantas, 2018). O magmatismo granítico brasileiro está presente sob a forma de plútons, stocks e batólitos com composições variadas, que ocorrem intrusivos nas unidades anteriores.

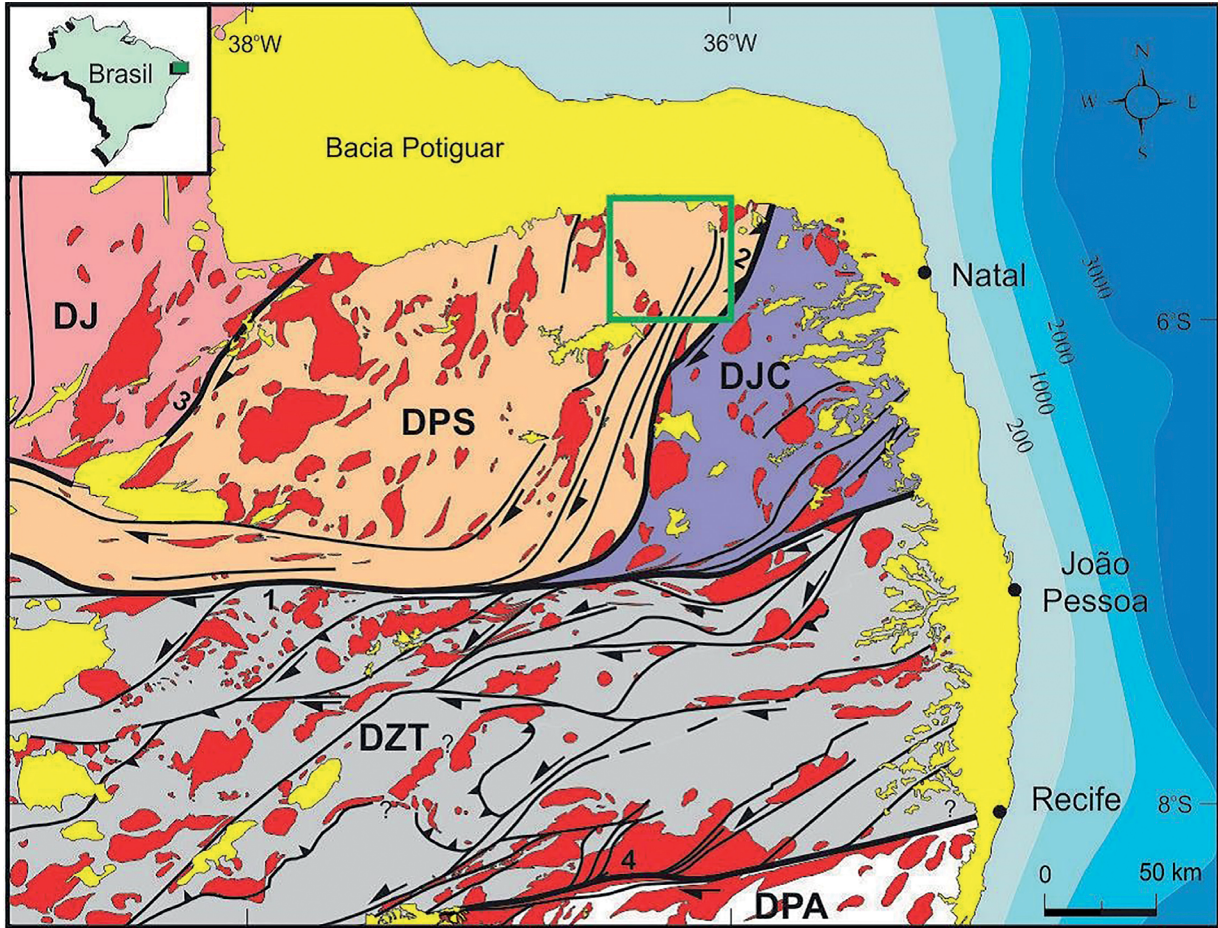
A sequência metavulcanossedimentar presente a oeste de Bonfim e a leste da Serra do Feiticeiro, composta de termos básicos a ácidos com assinatura geoquímica de rochas

vulcânicas, corresponde a uma unidade basal arqueana do Complexo Caicó, definida informalmente como Sequência Amaranite por Carvalho (1990).

Integrando ainda o embasamento da região, encontra-se o Maciço São José do Campestre (Figura 2), constituído de

gnaiesses e migmatitos de idade arqueana, datados no intervalo 3,4–2,7 Ga, por Dantas et al. (2004), que corresponde ao núcleo arqueano mais antigo conhecido na Província Borborema.

O Grupo Seridó é composto de três formações principais, considerando o empilhamento proposto por Jardim de



Fonte: Medeiros (2011)

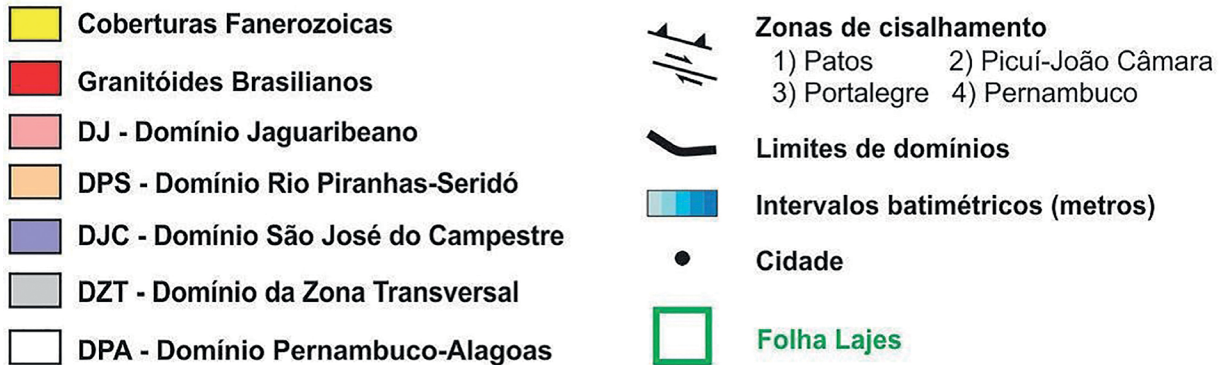


Figura 1. Quadro geológico regional da porção setentrional da Província Borborema, destacando os vários domínios. A região deste trabalho situa-se no Domínio Rio Piranhas-Seridó (Complexo Caicó), incluindo o Grupo Seridó, representado por rochas metassedimentares, além dos granitos granitoides brasilianos individualizados na Suíte Ígnea Brasileira. Destaca-se a área da folha geológica Lajes, na qual está inserido o depósito Bonfim.

Sá e Salim (1980) e Jardim de Sá (1984). Tem-se na base a Formação Jucurutu (mármore e rochas calcossilicáticas), sobreposta pela Formação Equador (quartzitos), tendo no topo pelitos da Formação Seridó. Os metapelitos são constituídos de granada-biotita xistos, por vezes com cianita e/ou sillimanita, e/ou andaluzita e/ou cordierita, que correspondem a metassedimentos argiloaluminosos brasileiros.

Admite-se uma evolução polifásica para as rochas metamórficas, metavulcânicas e/ou metassedimentares intensamente deformadas, cisalhadas e dobradas, e os terrenos mais antigos teriam sofrido deformação e metamorfismo no paleoproterozoico. As estruturas primárias principais foram reativadas e retrabalhadas juntamente com faixas móveis mais recentes, amalgamadas durante a evolução do Ciclo Brasileiro (Jardim de Sá et al., 1987), que corresponde ao último evento tectonometamórfico registrado na região Nordeste do Brasil, ocorrido há cerca de 600 Ma.

O Complexo Caicó e o Grupo Seridó, segundo Jardim de Sá (1984, 1994) e Jardim de Sá et al. (1987), sofreram três fases deformacionais principais, D1, D2 e D3, relacionadas

aos eventos metamórficos concomitantes, M1, M2 e M3, sendo que as duas primeiras fases afetaram apenas o embasamento, em condições de metamorfismo fácies anfibolito superior, e a última fase afetou todo o conjunto. A fase D1 pode ser interpretada como responsável pela formação de um bandamento composicional (ou foliação) S1//So, ou Sn//So, marcado pela alternância de bandas escuras ricas em minerais máficos (biotita e hornblenda) e bandas claras quartzo-feldspáticas (Souza et al., 2017).

O evento deformacional (D2) está associado a um sistema contracional, com empurrões gerando dobramentos recumbentes, com transposição nos flancos, o que estaria relacionado ao evento metamórfico M2 (Souza et al., 2017) de alto grau metamórfico (fácies anfibolito). Desse modo, o bandamento gerado na fase D1 foi dobrado pelo evento D2, gerando uma foliação plano axial (S2), paralela ao bandamento metamórfico ou foliação metamórfica (S1).

A terceira fase de deformação (D3) corresponde à fase de encurtamento crustal com a verticalização dos estratos e a formação de dobras sinformes e antiformes, abertas a

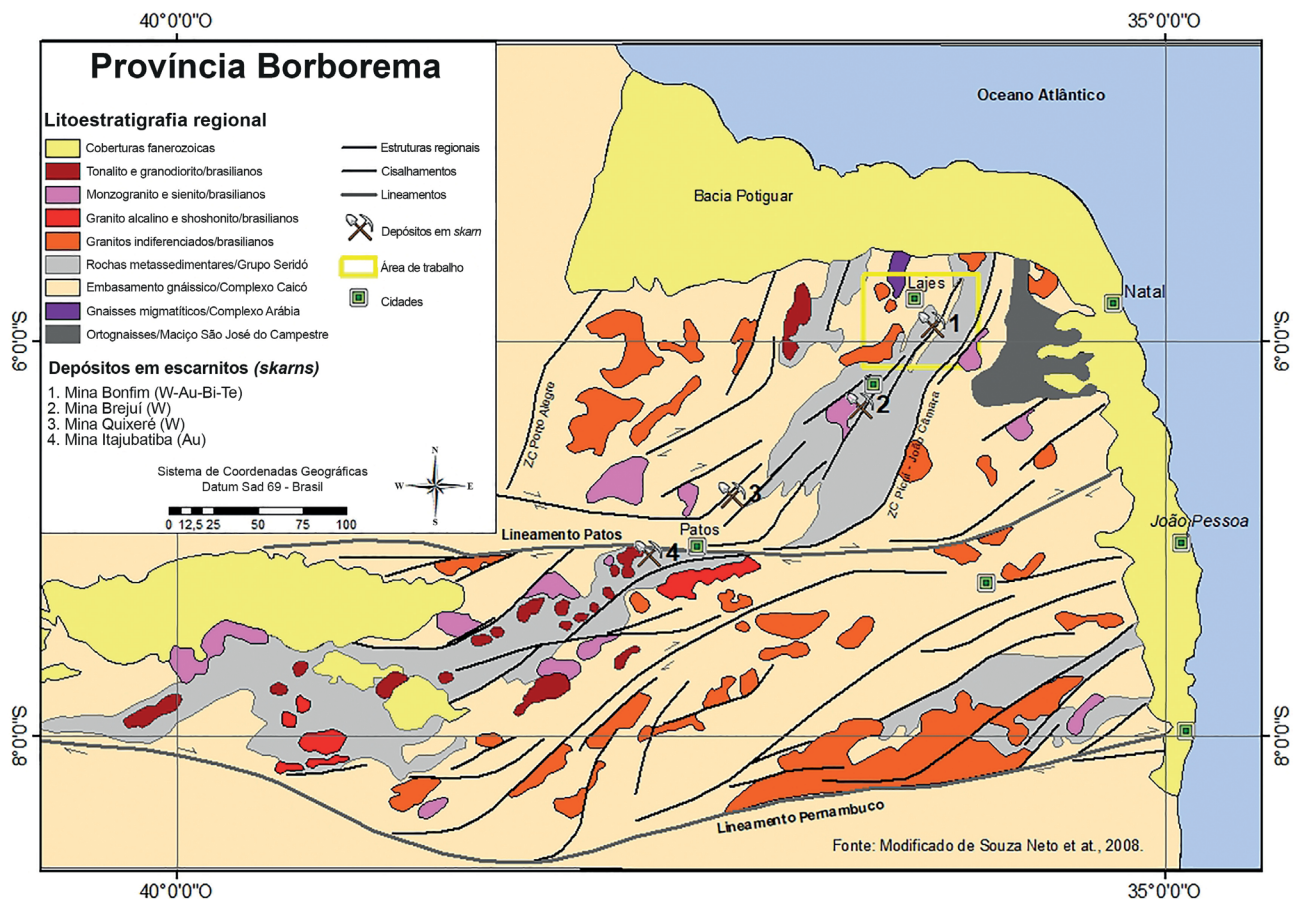


Figura 2. Mapa geológico regional da Província Borborema, destacando as distintas unidades litoestratigráficas presentes, desde o embasamento arqueano a paleoproterozoico aos granitos brasileiros. Encontra-se ainda a localização dos principais depósitos de scheelita e ouro, com ênfase ao depósito Bonfim na área de trabalho.

isoclinais, com a presença de uma foliação (S₃) com orientação regional NNE-SSW, associada à cinemática transcorrente brasileira, caracterizada por zonas de cisalhamento que exibem *trend* estrutural NE-SW. O evento metamórfico brasileiro M3 afetou tanto as rochas do embasamento quanto as litologias do Grupo Seridó, em condições de fácies xisto verde, superimposto aos eventos metamórficos anteriores. Uma quarta fase de deformação (D₄) foi descrita por Hackspacher e Sá (1984), que corresponde a uma fase com fraca penetrabilidade e disposta segundo o *trend* NW-SE.

Os granitos relacionados à orogênese Brasileira ocorrem estruturados por zonas de cisalhamento transcorrentes, correspondendo a corpos sintectônicos, ou pós-tectônicos, intrudidos durante os períodos Ediacarano e Cambriano (Archanjo et al., 2013). Considerando características petrográficas, geoquímicas e geocronológicas, esse plutonismo foi dividido em seis suítes magmáticas: shoshonítica, calcioalcalina de alto K porfirítica, calcioalcalina de alto K equigranular, calcioalcalina, alcalina e alcalina charnockítica (Nascimento et al., 2015).

Representantes dessa granitogênese brasileira foram datados, como a suíte intrusiva São João do Sabugi, com idade de 579 ± 7 Ma (Leterrier et al., 1994), e o plúton de Acari com idade U-Pb TIMs de 555 ± 5 Ma (Legrand et al., 1991), e U-Pb SHRIMP de $577 \pm 4,5$ Ma (granito porfirítico) e $572 \pm 4,6$ Ma (leucogranito), ambos no maciço granítico de Acari (Archanjo et al., 2013).

As idades das mineralizações de scheelita das minas Brejuí, Bodó e Bonfim foram obtidas por datações Re-Os em molibdenita, tendo sido determinado, para Brejuí, 554 ± 2 Ma; para Bodó, 510 ± 2 Ma; e para Bonfim, 524 ± 2 Ma, indicando três episódios mineralizantes no Grupo Seridó, associados a pulsos recorrentes de magmatismo ácido tardi-brasiliano (Hollanda et al., 2017).

O depósito de tungstênio Bonfim está hospedado no “Horizonte Bonfim”, que é representado por um pacote de mármore junto com rochas calciossilicáticas, dispostos acima de biotita gnaiesses (base do Grupo Seridó), tendo no topo biotita xistos granadíferos. A sequência corresponde à macroestrutura sinformal de Bonfim, que possui eixo com caimento 10° /NNE (Salim, 1979). Essa estruturação estaria relacionada à terceira fase de deformação (D₃), caracterizada por sucessivas dobras sinformes e antiformes com plano axial subvertical, relacionado a uma foliação plano axial S₃, com atitude $N15^\circ E/80^\circ SE$, ortogonal à foliação S₂ da segunda fase de deformação (D₂), constituída de dobras recumbentes, conforme observado por Salim (1979).

O último magmatismo relacionado à orogênese brasileira pode ser atribuído às intrusões pegmatíticas compostas de K-feldspato, quartzo, muscovita e biotita, que cortam rochas do embasamento gnáissico (Complexo Caicó) e faixas metassedimentares da Formação Seridó. Os pegmatitos são discordantes de todas as litologias, estando

dispostos segundo a direção NW-SE, exibindo xenólitos de suas encaixantes, notadamente dos xistos da Formação Seridó. Datações U-Pb obtidas em columbita-tantalita por Baumgartner et al. (2006), revelam idades de $514 \pm 1,1$ e $509 \pm 2,3$ Ma, as quais corresponderiam à fase tardia da orogenia brasileira.

No meso-cenozoico, durante a instalação da bacia potiguar, ocorreu o último episódio magmático no Rio Grande do Norte, responsável pela abertura de fraturas extensionais de direção WNW à E-W, nas quais se encaixam diques básicos de composição basáltica, de idade cretácica, consolidando o cenário tectônico e geológico da região do Seridó.

DEPÓSITOS W-AU DA REGIÃO DO SERIDÓ

A evolução tectonometamórfica do Grupo Seridó está relacionada à orogenia Brasileira (ca. 600 Ma), com os depósitos de tungstênio e ouro relacionados às intrusões graníticas em sequências metassedimentares. Os horizontes mineralizados ocorrem em mármore dolomíticos afetados por fluidos graníticos que levaram à geração de escarnitos por metassomatismo, os quais estão mineralizados em tungstênio (scheelita) e ouro. A maior parte dos depósitos de scheelita em escarnitos estão próximos a corpos graníticos (Figura 2), contudo alguns possuem caráter distal, com fluidos conduzidos por meio de zonas de cisalhamento.

Na região do Seridó, as condições de pico do metamorfismo do evento brasileiro foram estabelecidas em $550\text{--}600^\circ\text{C}$ e $3\text{--}4$ kbars, baseado em condições geotermobarométricas (Gama Jr. e Albuquerque, 1985; Lima, 1986).

Os principais depósitos de tungstênio do Seridó são Brejuí, Bodó, Bonito, Quixeré, Quixaba, Malhada Limpa, Bonfim e Itajubatiba, além de centenas de ocorrências de pequeno porte (Lima et al., 1980). Os depósitos compreendem escarnitos scheelitíferos oxidados, ricos em pirita, exceto Bonfim e Itajubatiba (Figura 2), que são mineralizados em ouro e possuem pirrotita como principal sulfeto, sendo considerados como escarnitos reduzidos (Souza Neto et al., 2008).

Bonfim e Itajubatiba apresentam características similares, tais como as rochas encaixantes, a morfologia dos escarnitos, a mineralogia dos estágios progressivo e retrogressivo e os minerais de minério.

A mineralização em Bonfim foi definida como escarnito desenvolvido em estágios progressivo e retrogressivo por Souza Neto et al. (2008), cujos minerais presentes no estágio progressivo seriam almandina, diopsídio, anortita e actinolita-magnésio-hornblenda. O estágio retrogressivo, por sua vez, teria sido marcado por álcali-feldspato, zoizita-clinozoizita-sericita substituindo anortita do estágio progressivo, além de calcita e clorita.

O ouro em Bonfim está associado ao estágio tardio da mineralização, de modo que se encontra disseminado,

juntamente com minerais pretos de granulação fina, que ocorrem preenchendo estreitas falhas dúcteis-rúpteis conjugadas, além de fraturas extensionais (Souza Neto et al., 2008). Em Itajubatiba, o ouro é controlado por cisalhamentos e fraturas, caracterizado pela associação com ferro e cobre (Souza Neto et al., 2008).

Elevados teores de flúor (até 9,490 ppm) foram encontrados em titanita e zoizita-clinozoizita, indicando a presença de fluidos metassomáticos ricos em flúor durante a formação do escarnito em Bonfim (Souza Neto et al., 1998).

METODOLOGIA

O presente artigo é o produto do trabalho de acompanhamento da abertura de galerias de desenvolvimento e de lavra da mina subterrânea Bonfim-II, por meio do mapeamento geológico-estrutural sistemático, desde a abertura da mina, no começo de 2013, até o fim de 2016, o que permitiu a definição da geologia e da estrutura do Corpo B de minério.

Foram coletadas 40 amostras do escarnito mineralizado *in situ*, nas galerias e nas câmaras da mina subterrânea, para estudos petrográficos sob luz transmitida e refletida, e também para análises por microsonda eletrônica no laboratório de microsonda eletrônica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), para caracterização do minério de ouro e sua paragênese sulfetada. As lâminas polidas e seções polidas para a minerografia foram feitas seccionando as fraturas preenchidas por minerais escuros de bismuto, as quais hospedam a mineralização aurífera.

Os objetivos deste trabalho, considerando os fatos obtidos por meio das observações feitas em subsolo aliadas à petrografia, são definir a geologia e o controle estrutural do corpo de minério, principalmente da mineralização aurífera em Bonfim-II, contribuindo para a identificação de novos minerais na assembleia mineralógica do escarnito, e caracterizar o minério de ouro e sua paragênese sulfetada.

As análises químicas dos minerais foram feitas na microsonda eletrônica (*Electron Probe Micro Analyser* — EPMA) Jeol Modelo Superprobe JXA-8230, com microscópio eletrônico de varredura (MEV), por meio do método de dispersão por energia (EDS) e por comprimento de ondas (WDS), cujas condições analíticas utilizadas foram 20 KV de voltagem de aceleração e 20 nA de feixe de corrente, com tempo de contagem para todos elementos no pico e *background* de 5 e 10 s, tendo sido usada para as análises a microsonda eletrônica do IG/UnB.

GEOLOGIA DA MINA

Os xistos da Formação Seridó recobrem toda a região de contato entre ortogneisses e rochas calcossilicáticas (escarnitos),

afetadas por intrusões pegmatíticas (Figura 3), de modo que o corpo de minério da Mina Bonfim-II se encontra 90 m abaixo da superfície.

A rampa de acesso à mina foi escavada em biotita xistos (Formação Seridó) e desenvolvida ao longo de rochas calcossilicáticas e mármore com estrutura bandada disposta segundo a orientação N10°E/30°SE, os quais corresponderiam à Formação Jucurutu. A unidade de mármore é constituída de tremolita-flogopita mármore de composição silicosa (cor castanho-clara), com alternâncias de mármore calcíticos de cor salmão e mármore cristalinos dolomíticos de cor branca, cuja espessura chega a 18 m.

O corpo de minério é um escarnito que ocorre sob a forma de camada máfica (escura), bandada, competente e estreita (< 1 m), disposta segundo a direção N10°E/30°SE, abaixo do pacote de tremolita-flogopita mármore por contato brusco e concordante, e acima da unidade subjacente de flogopita xistos, com contato concordante e gradacional.

É possível observar no escarnito uma zonização vertical na qual o contato de topo com tremolita-flogopita mármore marcaria a zona superior, que por vezes pode estar preenchido por molibdenita maciça. Logo abaixo se define a zona central do escarnito, rica em diopsídio e actinolita (zona do diopsídio), de cor verde-escura com espessura de 0,50 a 1 m (Figura 4), mineralizada em scheelita e molibdenita, podendo ser associada ao estágio progressivo de formação do escarnito. Por contato brusco, abaixo da zona central encontra-se a zona inferior, com níveis de zoizita-clinozoizita (rosada) ao longo da foliação reliquiar (zona da clinozoizita), indicativa do estágio retrogressivo do escarnito, proveniente da alteração metassomática de flogopita xistos subjacentes. A zona inferior é marcada por grande quantidade de falhas e fraturas de cisalhamento subverticais de direção NW-SE (Figura 4), preenchidas por minerais metálicos escuros de bismuto, intimamente associados à mineralização aurífera.

O mapeamento geológico do corpo de minério na região de contato do pacote de mármore com flogopita xistos, permitiu individualizar dois tipos de escarnito, considerando o protólito: o escarnito máfico formado a partir da alteração metassomática da camada de mármore, que corresponde à zona central do escarnito; e o escarnito félsico de cor verde-clara, que exibe fraturas subverticais com minerais de bismuto de cor preta, mineralizadas em ouro, que fazem parte da zona inferior do escarnito, formada a partir da alteração de flogopita xistos que constituem a unidade basal da sequência litológica mapeada na mina.

O escarnito encontra-se boudinado com plunge de baixo ângulo de caimento (12°) ao longo da direção principal N10°E (Figura 5), correspondendo ao eixo do boudin, que estruturalmente corresponde ao pescoço ou *neck* do boudin.

Observam-se feições de boudinagem associadas às variações na espessura do corpo de minério, conforme pode ser visto nas câmaras de lavra da mina, onde se observa boudins

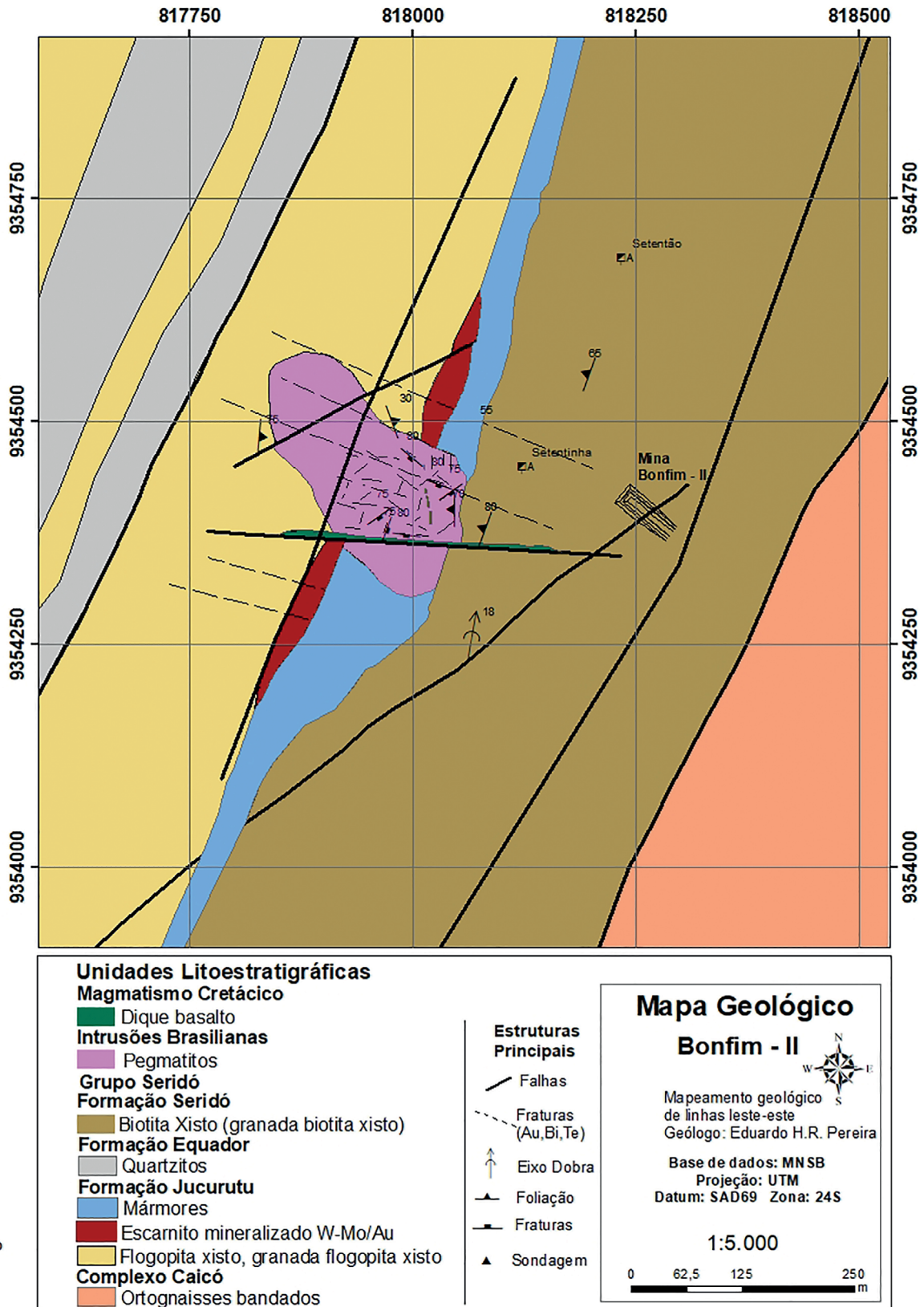


Figura 3. Mapa geológico na região da Mina Bonfim-II em escala 1:5.000. Destacam-se as falhas e as fraturas de direção NW que correspondem às estruturas tardias que controlam a mineralização aurífera.

de escarnito ricos em scheelita com intervalos que sofrem estrangulamento abrupto, passando de 1 m de espessura para 0,10 m. Nota-se também variações na largura do corpo de minério, o que é perceptível em escala de mapa, como pode ser visto no nível 215 da mina (Figura 6), evidenciando a forma boudinada do corpo de minério, individualizando os corpos de minério sul e norte. Esse nível está a 90 m de profundidade, considerando o emboque da rampa na cota 305 m acima do nível do mar.

O mapeamento geológico dos segmentos inferiores da mina também exhibe o corpo de minério com a mesma estrutura, tendo boudins estéreis de mármore dolomítico internamente (Figura 7). No nível 188 da mina subterrânea foi mapeada uma camada de mármore dolomítico dentro do corpo de minério, em escala de detalhe 1:250 (Figura 7). Nota-se ainda a presença de boudins centimétricos de mármore dolomítico branco dentro da camada do escarnito máfico scheelitífero, os quais correspondem a porções reliquias que não foram completamente transformadas em escarnitos (Figura 8C),

sendo evidências de que o mármore dolomítico é o protólito do escarnito máfico.

A mineralização de tungstênio está presente sob a forma de cristais de scheelita, estirados ao longo do bandamento do escarnito máfico, exibindo o formato de boudins de scheelita (Figura 8E). Associado ao tungstênio, encontram-se concentrações significativas de molibdênio sob a forma de molibdenita, disseminada ou maciça, além de pirrotita disseminada e calcopirita subordinada.

A correlação genética e estrutural da scheelita no escarnito mostra que a mineralização de tungstênio possui caráter sin-tectônico, consistindo na primeira fase de mineralização, correspondente ao sistema W-Mo. Os boudins de scheelita podem ser vistos nitidamente sob luz ultravioleta, em razão da fluorescência da scheelita, que em Bonfim exhibe cor azul neon típica (Figura 8F).

Abaixo do pacote de mármore bandados encontra-se o flogopita xisto, de granulação fina à média, foliação proeminente, por vezes textura porfiroblástica marcada por cristais

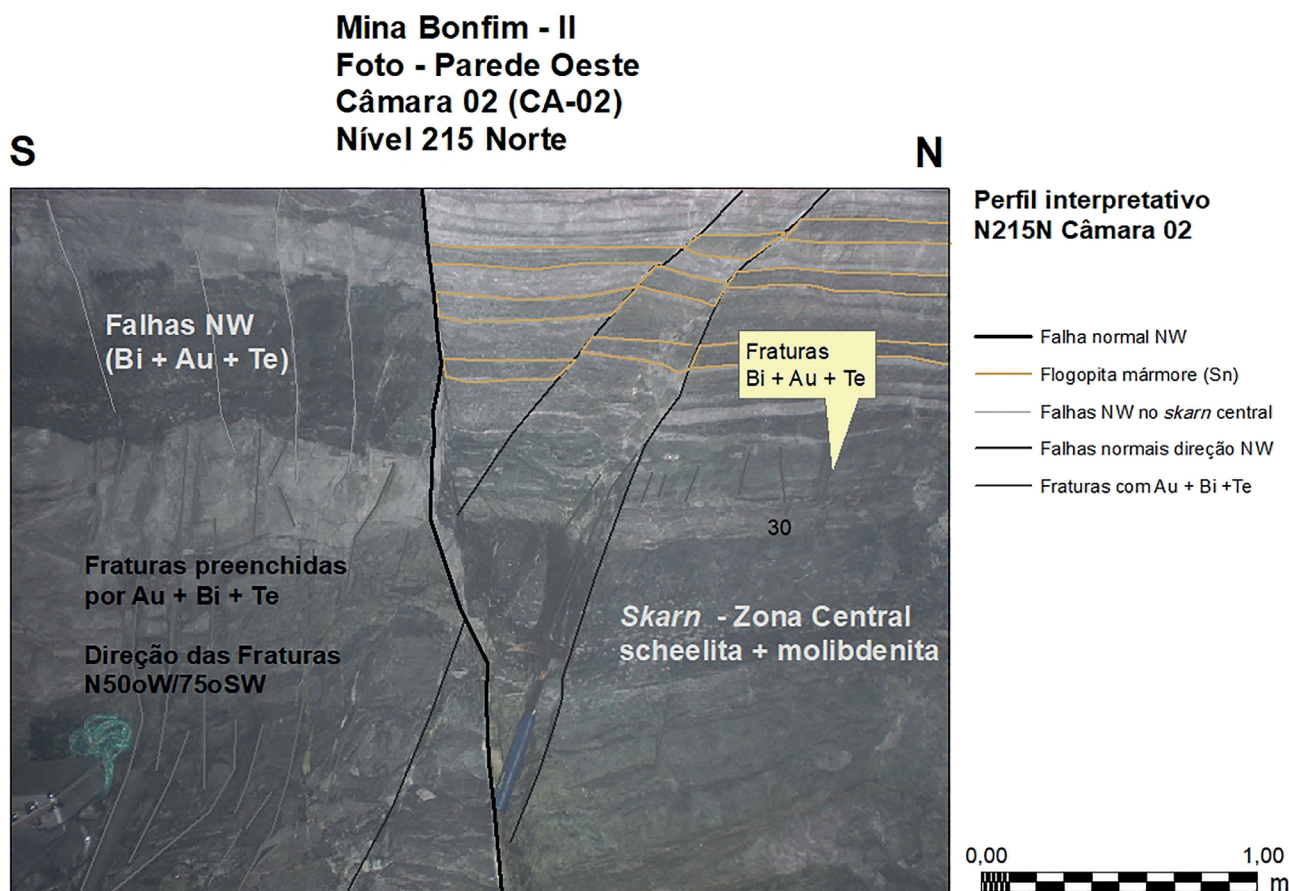


Figura 4. Escarnito com orientação N10°E/30°SE, mostrando a zona central máfica mineralizada em scheelita e molibdenita, deslocada por falha de direção NW-SE, que faz parte da família de fraturas subverticais com atitude N50°W/55°SW, preenchidas por minerais de bismuto associados à mineralização aurífera, presentes na zona inferior do escarnito. Frente de lavra no nível 215 norte da Mina Bonfim-II.

de granada (almandina), com diâmetro médio de 1 cm, além de pirrotita, que pode ocorrer tanto disseminada quanto em bolsões milimétricos maciços, ou mais raramente ocupando sombras de pressão de pórfiros de granada.

Além da deformação dúctil a qual foi submetido o corpo de minério bandado rico em scheelita, existe um sistema de estruturas dúctil-rúptil que também afetou o escarnito, sendo representado por falhas direcionais e fraturas de cisalhamento subverticais, dispostas segundo a direção N50°W a N70°W, com mergulho em torno de 75°SW (Figura 8G). Essas estruturas são preenchidas predominantemente por prehnita e minerais opacos escuros de bismuto, que estão associados ao ouro, podendo ser vistas em todos os níveis da mina subterrânea seccionando e deslocando a camada máfica (zona central) do escarnito de direção NNE (Figura 7), comprovando o caráter tardio da mineralização aurífera presente nessas estruturas com orientação NW.

Observa-se que as falhas e as fraturas de direção NW à WNW exibem feições de movimento ao longo da direção, de forma paralela às paredes das fraturas, correspondendo a falhas e fraturas de cisalhamento com terminações em *splay*

(Figura 8H), que definem o controle estrutural da mineralização aurífera. Tais estruturas podem ser classificadas como falhas direcionais sintéticas, pois as terminações são sintéticas em relação à falha principal (Fossen, 2010).

Na zona inferior do escarnito félsico, é possível observar fraturas preenchidas por bismuto que cortam porções ricas em clinozoizita, de cor rosa-clara, juntamente com epidoto, que correspondem aos minerais que evidenciam a paragênese de baixo grau metamórfico e que caracterizam a fase retrógrada do escarnito, revelando que a mineralização aurífera, além de tardia, é posterior à fase retrógrada do escarnito.

As falhas e as fraturas com bismuto e ouro também podem ser vistas cortando boudins de mármore dentro do escarnito máfico bandado (Figura 8D), mostrando que as fraturas de direção NW e WNW, além de tardias ao metamorfismo e à alteração metassomática que gerou o escarnito (estágio progressivo e retrogrado), também são posteriores à deformação e à boudinagem do escarnito e dos mármore, portanto tardi a pós-tectônicas. Tal fato deixa claro que a mineralização aurífera pertence a uma segunda fase de mineralização. Além disso, a presença de prehnita na

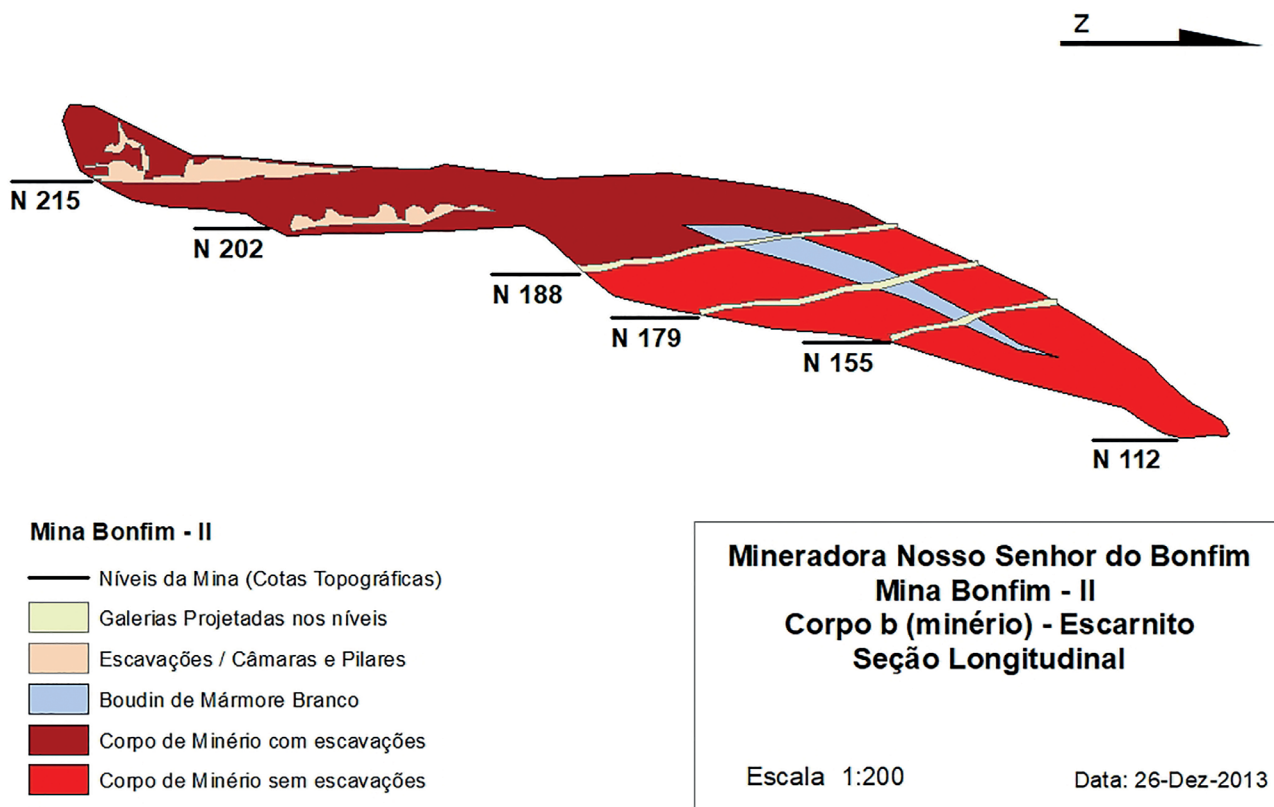


Figura 5. Seção longitudinal do corpo de minério Bonfim-II, modelado no *software* Surpac (Gemcom) com base no banco de dados de sondagem e em informações de mapeamento estrutural, mostrando a forma de um grande boudin disposto segundo a direção NNE, com plunge de baixo ângulo ao longo de sua direção. Corpo de minério com as escavações dos níveis superiores da mina subterrânea abertos.

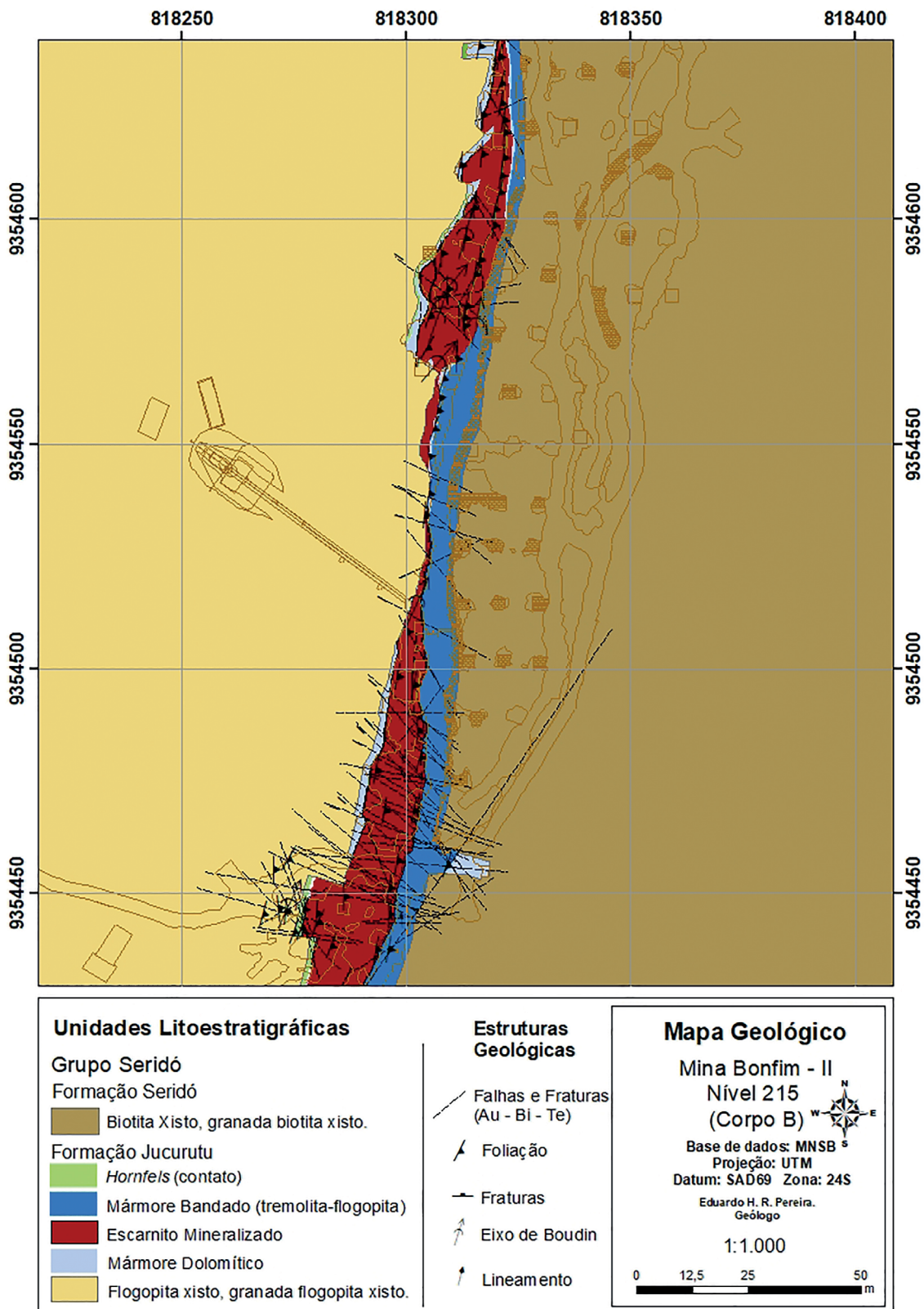


Figura 6. Mapa geológico-estrutural da Mina Bonfim-II no nível 215, mostrando falhas e fraturas com orientação predominante segundo a direção NW, que correspondem às estruturas mineralizadas em ouro, bismuto e telúrio na mina subterrânea (escala 1:1.000).

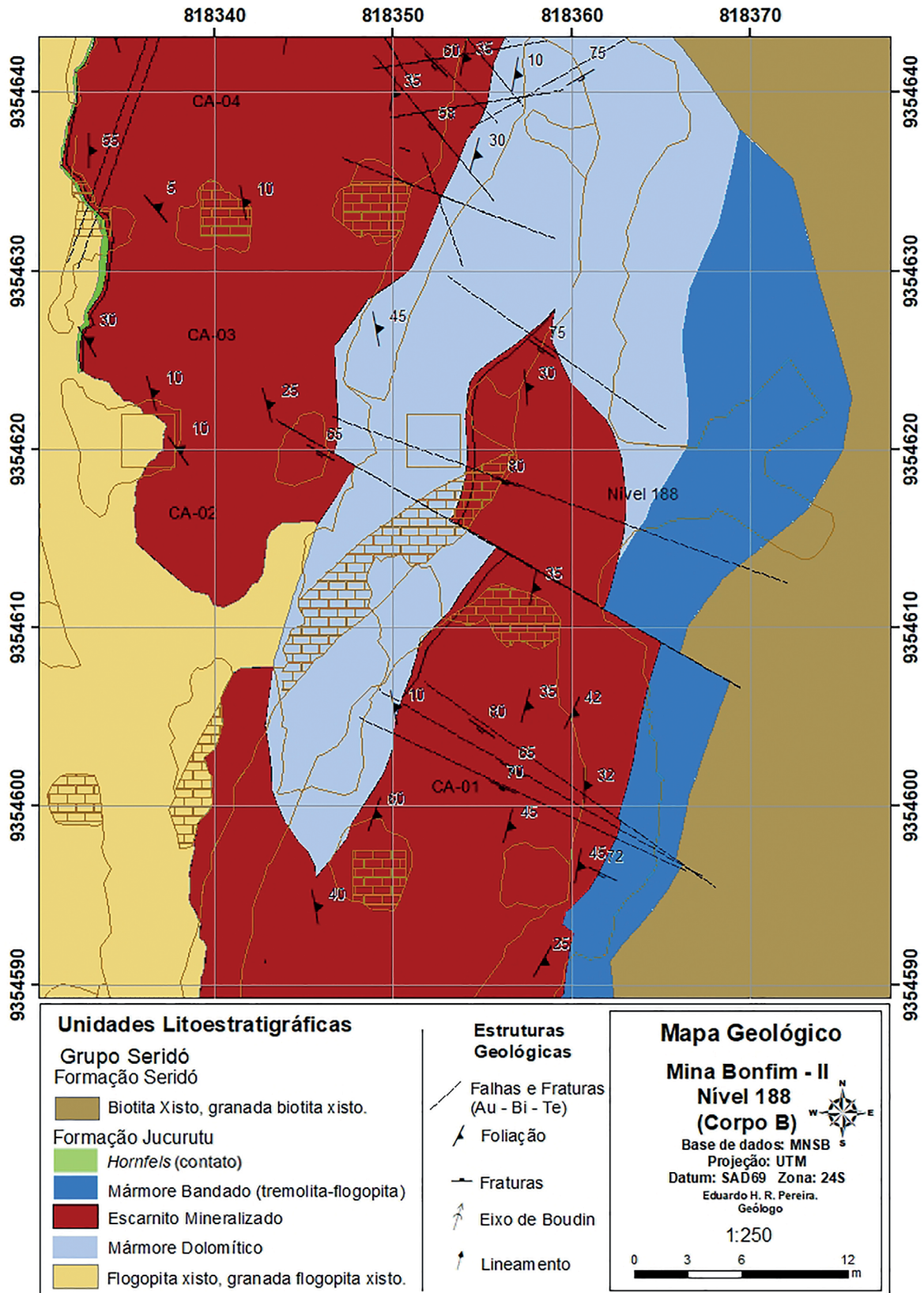


Figura 7. Mapa geológico de detalhe do boudin de mármore branco mapeado na entrada do nível 188. Destacam-se as estruturas, as falhas e as fraturas de direção NW, que controlam a mineralização aurífera.

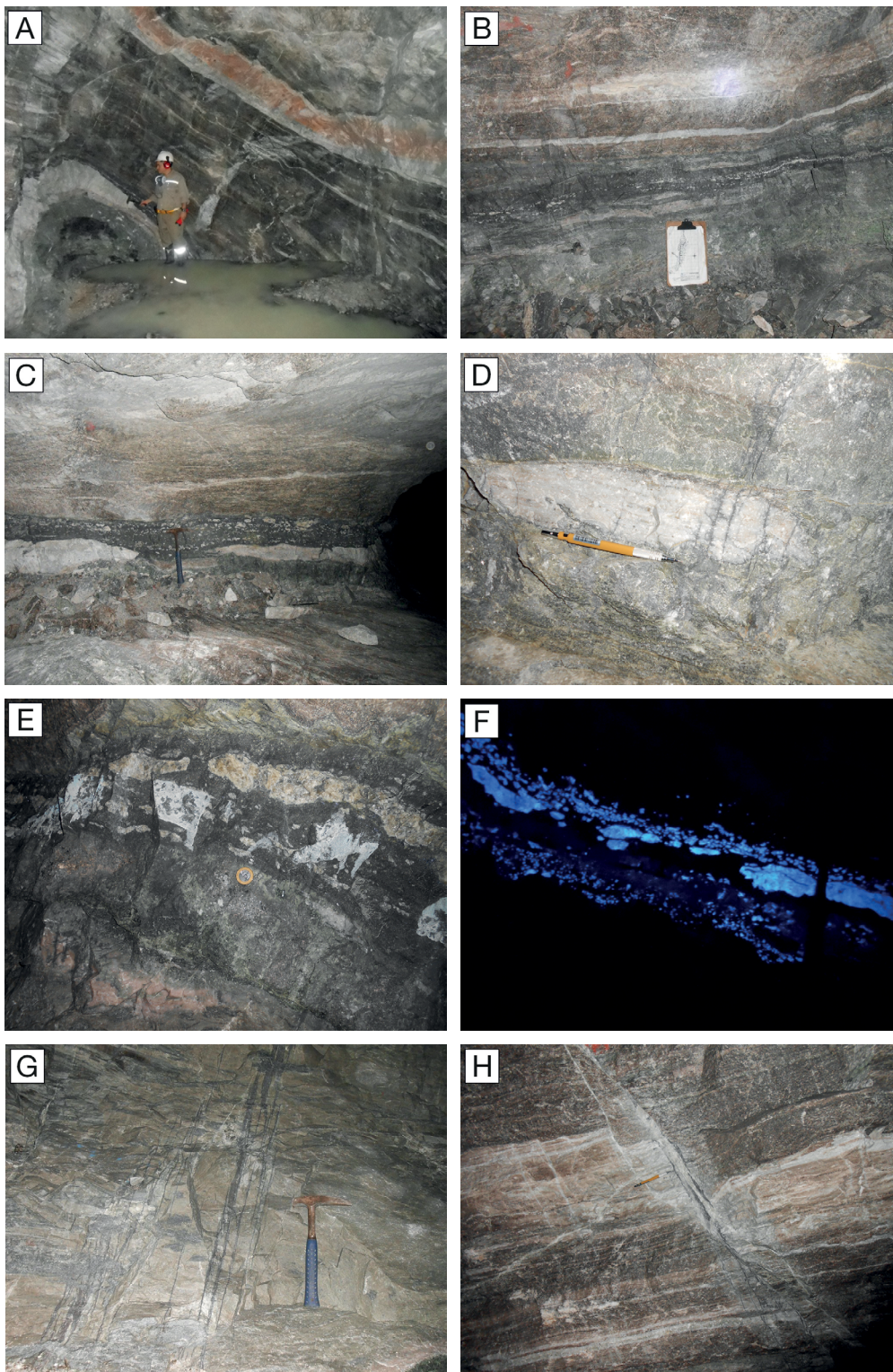


Figura 8. Feições geológicas e estruturas da mina. (A) Mármoreos bandados acima do escarnito; (B) escarnito no contato entre tremolita-flogopita mármoreos e flogopita xistos na base; (C) boudins de mármore dolomítico dentro da camada do escarnito; (D) boudin de mármore dolomítico seccionado por fraturas com minerais de bismuto dentro do escarnito; (E) camada de escarnito com boudins de scheelita; (F) boudins de scheelita vistos com luz ultravioleta; (G) fraturas preenchidas por minerais de bismuto preto; (H) falha de direção NW preenchida por minerais de bismuto com terminação em *splay* na parte inferior.

ganga indica que a precipitação do ouro ocorreu em fácies prehnita-pumpellyita.

As fraturas preenchidas por bismuto com ouro associado prolongam-se como vênulas praticamente subverticais e paralelas (*sheeted veins*), abaixo do escarnito máfico, ainda dentro da zona de alteração, podendo chegar até 3 m abaixo do escarnito máfico, ampliando de modo significativo a espessura da mineralização aurífera.

PETROGRAFIA

O escarnito formado a partir do metassomatismo associado aos mármores e flogopita xistos constituindo a zona central do corpo de minério principal, rico em scheelita e molibdenita, é classificado como diopsídio escarnito, possuindo granulação fina à média, textura nematoblástica à granoblástica, sendo constituído, predominantemente, de diopsídio, além de actinolita, tremolita, calcita, dolomita, clorita, muscovita e plagioclásio reliquiar.

Os cristais de diopsídio geralmente são milimétricos (> 2 mm), por vezes hipidioblásticos, fortemente fraturados com sericita e carbonato nas fraturas, com inclusões de actinolita, plagioclásio reliquiar, lamelas de clorita, muscovita, e cristais de titanita. O diopsídio também ocorre sob a forma de subgrãos (< 1 mm) xenoblásticos.

Nota-se que há orientação no escarnito marcada por lamelas de muscovita e clorita juntamente com actinolita entre os grãos de diopsídio, evidenciando a presença de estrutura foliada e/ou bandada na zona central do corpo de minério.

O escarnito originado a partir da alteração de flogopita xistos é de granulação muito fina a afanítica, individualizado na mina como escarnito xistoso, exibindo cor verde-clara, composto de diopsídio de granulação fina (0,10–0,20 mm), clorita, sericita (< 0,1 mm), carbonato, epidoto e zoizita-clinozoizita, que correspondem a minerais da fase retrógrada do escarnito.

A assembleia mineral presente, aliada às texturas e às características da alteração, permite propor que ocorreu intenso processo de alteração de feldspatos gerando sericita, epidoto e calcita, sob condições de fácies xisto verde, durante o metassomatismo e a formação do escarnito.

Lamelas de muscovita e clorita ocorrem de forma orientada, marcando uma direção preferencial, caracterizando uma foliação conspícua na zona inferior do escarnito, a qual aumenta gradativamente em direção ao contato com o flogopita xisto.

Destaca-se a presença de um mineral de cor verde (verde-garrafa), xenoblástico, isotrópico, alto relevo, com tamanhos de 0,25–05,0 mm, disperso em matriz sericítica, raramente encontrado nas lâminas, identificado como granada cromífera (Figura 9A), possivelmente um tipo de granada intermediária entre grossulária e uvarovita.

As fraturas auríferas são constituídas basicamente de prehnita (Figura 9B), minerais opacos de bismuto e telúrio associados, ocorrendo junto às lamelas ou estirados e preenchendo fraturas e clivagens ao longo das lamelas de prehnita, que comumente coincidem com a direção das fraturas mineralizadas em ouro.

A presença de prehnita, junto à mineralização aurífera em fraturas e veios mineralizados, pode ser considerada um indicativo das condições de metamorfismo durante a precipitação do ouro, que teria ocorrido em fácies metamórfico de grau muito baixo (fácies phrenita-pumpellyita), inferior ao grau metamórfico da fase retrógrada do escarnito, caracterizando a segunda fase de mineralização do sistema Au-Bi-Te.

MINEROGRAFIA

Os principais minerais metálicos identificados ao microscópio, além dos elementos nativos ouro e bismuto, foram: bismutinita, molibdenita, pirrotita, calcopirita e gersdorffita como sulfetos, além dos teluretos de bismuto, joseíta e hedleyita, que compreendem a assembleia de metálicos presentes no escarnito da Mina Bonfim-II. Destaca-se que a gersdorffita e a hedleyita são descritas pela primeira vez em Bonfim.

É característica do ouro exibir refletividade muito alta ($r_{Au} = 83,40\%$), contudo os grãos observados possuem cor amarelo-pálido, com menor intensidade, em razão dos elevados teores em prata chegando até 16,09%Ag (Tabela 1).

O tamanho dos grãos de ouro compreende diâmetros entre 1 e 20 μm (Figura 9), tendo raramente dimensões maiores que 50 μm , e o maior grão atinge 70 μm de diâmetro, mostrando que o ouro é muito fino. As principais formas de ocorrência dos grãos de ouro são ouro livre na ganga (Figura 9C), ouro em contato com bismuto nativo, bismutinita ou joseíta e, por último, ouro em fraturas da ganga.

Os grãos de ouro, quando livres na ganga, podem ocorrer de forma disseminada, como gotículas ou com formas irregulares. O ouro, quando associado ou em contato com bismuto (bismutinita e joseíta), normalmente tem formas irregulares e variadas, podendo ser encontrado na borda do bismuto (bismutinita e joseíta) ou como inclusão. Quando em fraturas, o ouro encontra-se alongado, assumindo a forma da fratura.

O bismuto ocorre junto com ouro em contato ou em fraturas, fazendo parte da paragênese aurífera (Figura 9D). A bismutinita (Bi_2S_3), de composição química 81,3%Bi, 18,7%S (Anthony et al., 1990), é o segundo mineral de bismuto mais abundante associado à mineralização aurífera (Figura 9E). Diferencia-se do bismuto nativo em razão da refletividade mais baixa, conforme pode ser visto na Figura 9F, além de possuir birrefletância distinta.

Observa-se bismutinita de modo intersticial na ganga com dimensões entre 100 e 1.000 μm , com bismuto nativo

reliquir internamente ou nas bordas, comprovando que o sulfeto foi originado a partir do elemento nativo (Figura 9F).

Além de bismuto e bismutinita, encontra-se ainda como parte integrante da paragênese aurífera a joseíta (Figura 9G), que é um telureto de bismuto (Bi_4TeS_2). Este pode ocorrer tanto disseminado na ganga quanto em fraturas. Encontra-se joseíta em contato com grãos de bismuto nativo (Figura 9H) ou junto à bismutinita, tanto nas bordas quanto internamente, indicando íntima relação de crescimento da joseíta a partir da bismutinita.

Outro telureto de bismuto identificado, porém em menor proporção, é a hedleyita (Bi_7Te_3), uma vez que o telureto predominante é a joseíta. Presente de forma rara, ainda como integrante da assembleia de sulfetos nos escarnitos, foi determinado um sulfeto de arsênio e níquel cuja composição corresponde à gersdorffita (NiAsS), confirmada por análise de microsonda eletrônica.

Encontra-se comumente outros sulfetos, tais como molibdenita, pirrotita e, subordinadamente, calcopirita. A molibdenita é o sulfeto mais abundante nas seções polidas, contudo deve-se ressaltar que não foram encontrados grãos de ouro associados à molibdenita, não havendo relação paragenética entre ouro e molibdênio.

A pirrotita ocorre de forma disseminada, visível a olho nu, porém não é encontrada junto ao ouro. A calcopirita (CuFeS_2) está presente de modo subordinado, podendo ser observada nas bordas de cristais de Bi nativo, portanto associada ao ouro.

Deve-se salientar que não foi observado ouro sob a forma de telureto (telureto de ouro), de modo que os grãos

de ouro analisados correspondem a ouro livre, em fratura ou em associação com bismuto, sulfetos e teluretos de bismuto, portanto passível de ser recuperado por métodos de beneficiamento para minério de ouro, como cianetação, utilizando lixiviação em pilhas, conforme praticado na Mina Bonfim.

ANÁLISES QUÍMICAS

Foram identificados por minerografia e confirmados por análises de microsonda eletrônica oito minerais metálicos, presentes nos escarnitos, além do ouro. Minerais de ganga também foram analisados, destacando-se 12 minerais não metálicos entre os 17 silicatos que compõem a ganga, os quais constam da tabela de composição química.

Análises de microsonda eletrônica em grãos de ouro selecionados foram realizadas, obtendo-se a composição média do ouro com 82,34%Au e 15,57%Ag. Observa-se que o ouro possui elevados teores em prata, podendo ter até 16,09%Ag, o que leva a uma redução aparente na refletividade do ouro, cujos grãos exibem cor amarelo-clara pálida.

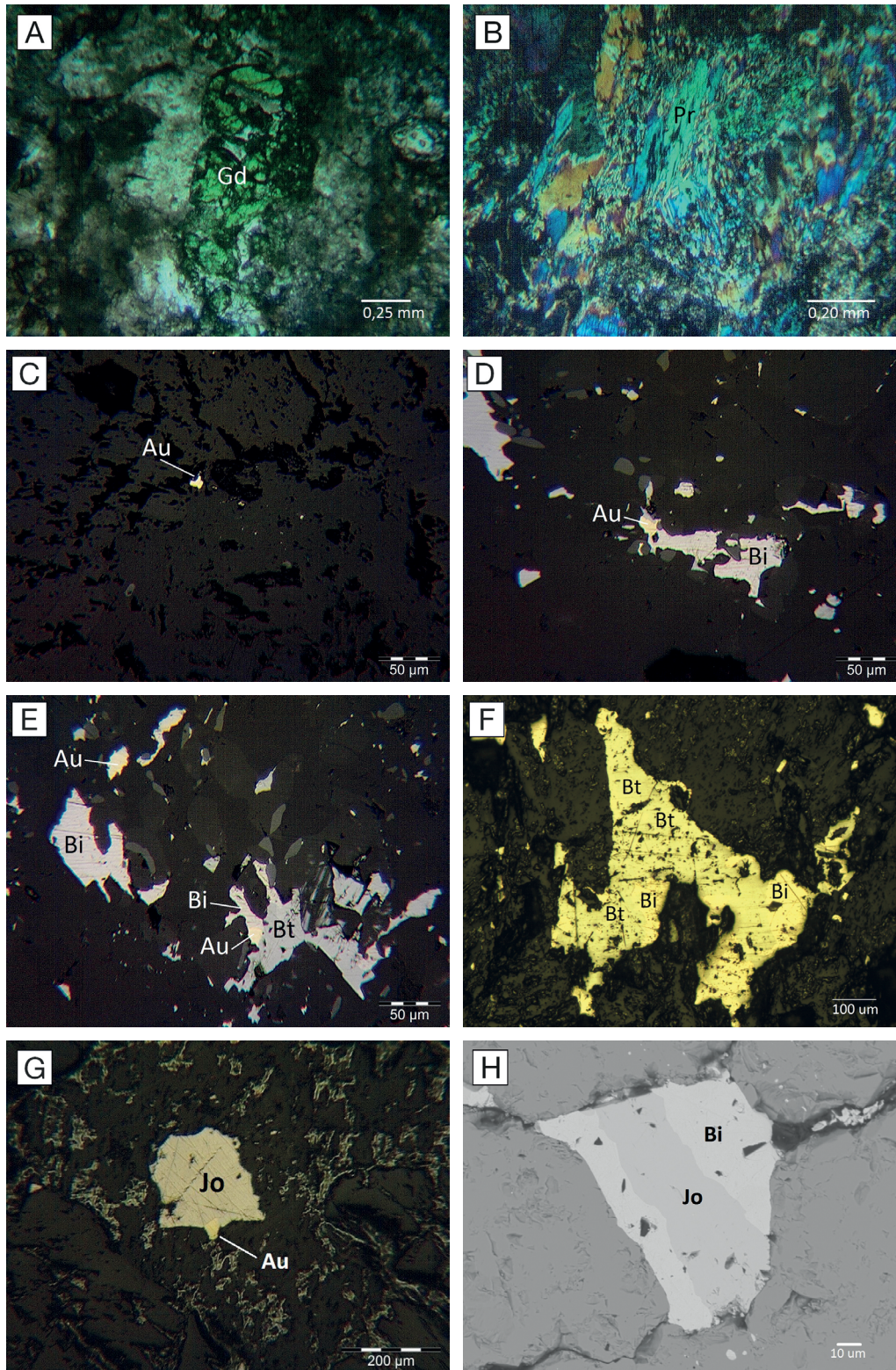
Deve-se notar ainda que o ouro possui pequena proporção de bismuto (0,44%Bi) em sua composição química, explicitando íntima relação genética. O mesmo é observado em relação ao telúrio, que pode chegar até 0,16%Te em grãos de ouro (Tabela 1).

Análises químicas em testemunhos de sondagem de escarnitos mostram que elevados teores em ouro (> 10 ppm Au) normalmente estão relacionados a altos teores em bismuto

Tabela 1. Resultados das análises químicas de microsonda eletrônica em grãos de ouro do escarnito.

| Análises | Au1 | Au2 | Au3 | Au4 | Au5 | Au6 | Au7 | Au8 | Au9 | Au10 | Au11 | Au12 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bi (wt%) | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 0,44 | 0,37 | 0,33 | 0,20 | 0,37 | 0,18 | 0,40 | 0,39 | 0,31 |
| Fe | 0,20 | 0,10 | 0,06 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,05 | 0,07 |
| Cu | 0,07 | 0,08 | na | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ag | 15,41 | 15,50 | 16,09 | 15,79 | 15,82 | 15,67 | 15,42 | 15,12 | 14,98 | 15,57 | 15,70 | 15,75 |
| Te | 0,00 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,00 | 0,04 | 0,16 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,03 | 0,09 |
| S | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,04 |
| Mo | 0,24 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Au | 80,92 | 81,36 | 83,33 | 81,90 | 81,93 | 83,44 | 82,68 | 83,20 | 83,20 | 81,67 | 82,15 | 82,35 |
| Total | 97,03 | 97,35 | 99,77 | 98,25 | 98,15 | 99,68 | 98,62 | 98,91 | 98,48 | 97,89 | 98,39 | 98,65 |
| Bi (at%) | 0,00 | 0,00 | nc | nc | nc | nc | nc | nc | nc | nc | nc | nc |
| Fe | nc | nc | nc | 0,00 | nc | 0,00 | nc | nc | nc | nc | nc | nc |
| Cu | nc | nc | nc | nc | nc | nc | nc | 0,00 | 0,00 | 0,00 | nc | 0,00 |
| Ag | 0,25 | 0,25 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,24 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| Te | 0,00 | nc | nc | nc | 0,00 | nc | nc | nc | nc | nc | nc | nc |
| S | nc | 0,00 | nc | 0,00 | nc | nc | nc | 0,00 | 0,00 | nc | nc | nc |
| Mo | nc | nc | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | nc |
| Au | 0,73 | 0,73 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,74 | 0,74 | 0,74 |
| Total | 0,98 | 0,98 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

nc: não calculado; na: não analisado.



Gd: granada; Pr: prehnita; Au: ouro; Bi: bismuto; Bt: bismutinita; Jo: joseíta. Aumento = ocular × objetiva: 40X.

Figura 9. Fotomicrografias de amostras de escarnitos da Mina Bonfim-II. (A) Granada cromífera de cor verde, N// – 40X; (B) lamelas de prehnita, NX – 100X; (C) ouro livre na ganga; (D) ouro em contato com bismuto, 400X; (E) ouro em contato com bismuto e bismutinita, 400X; (F) bismutinita com bismuto nas bordas, 100X; (G) ouro em contato com joseíta, 200X; (H) joseíta associada com bismuto (microscópio eletrônico de varredura – MEV).

e telúrio (Tabela 2), comprovando quimicamente a associação entre os elementos.

A tabela de composição química mostra que o bismuto nativo é composto praticamente de bismuto, apresentando praticamente 99%Bi, tendo ainda pequenas proporções de Fe, Cu, Ag e Se, respectivamente, em que se destaca o teor de selênio, que chega até 0,21%Se nos grãos de bismuto (Tabela 3). Nota-se que não foi detectado selênio na bismutinita, o qual deveria fazer parte de sua composição química. Além disso, também estão ausentes Pb, Fe e Te, os quais também deveriam fazer parte da composição.

O principal sulfeto que integra a paragênese aurífera é a bismutinita, que tem em média 80%Bi, e em menores proporções, enxofre e cobre, este em pequena proporção (0,16%Cu), o que pode ser admitido com base na fórmula química da bismutinita, conforme determinado por Anthony et al. (1990).

Por outro lado, cristais de calcopirita analisados chegam a ter até 0,32%Bi composicionalmente, o que não é comum para a calcopirita, evidenciando enriquecimento em bismuto, o que leva a incluir esse sulfeto na paragênese aurífera.

As análises de bismutinita revelam pequeno percentual de molibdênio em sua composição química, atingindo até 0,37%Mo (Tabela 3), o que não faz parte da composição química estabelecida para a bismutinita, podendo refletir contaminação.

Resultados de análises mostram que pode ser encontrado até 0,61%Bi na composição de cristais de molibdenita,

podendo estar relacionado a pequenas fraturas tardias, ricas em Bi, que cortam porções do escarnito com molibdenita.

Quanto aos teluretos de bismuto, observa-se que há ligeiro empobrecimento em Te na joseíta (10,26%Te), considerando os valores de telúrio determinados para a joseíta (Anthony et al., 1990), que variam de 12,00 a 15,93%Te. Além disso, a hedleyita pode apresentar até 21,42%Te (Tabela 3), sendo o mineral mais rico em telúrio no escarnito.

As proporções de selênio nos teluretos analisados variam de 0,32 a 0,37%Se (Tabela 3), o que é normal para a hedleyita, contudo para a joseíta é um valor baixo, indicando deficiência em selênio, uma vez que os valores da literatura, conforme Anthony et al. (1990), são da ordem de 1,48 a 2,84%Se para a joseíta.

Os dados obtidos com as análises de pirrotita mostram que ela apresenta pequena deficiência em ferro (58,83%Fe) em relação à composição ideal registrada na literatura (Anthony et al., 1990), que é de 62,33% de Fe para 37,67% de S.

Análises pontuais de microsonda foram feitas na ganga, que é composta, predominantemente, de diopsídio. Observa-se que o diopsídio apresenta baixo teor de magnésio (Tabela 4) quando comparado com os teores determinados por Anthony et al. (1990). Elevados teores de ferro (6,69%FeO) presente em diopsídio provavelmente podem indicar condições de formação e/ou alteração do escarnito em ambiente reduzido.

Os minerais cálcicos presentes na assembleia mineralógica do escarnito são diopsídio, actinolita e tremolita

Tabela 2. Resultados de análises químicas de testemunhos de sondagem de escarnitos.

| Furos Sonda | Prof. De (m) | Prof. Até (m) | Interval metros | Amostra Id # | Au ppm | Ag ppm | Bi % | Cu ppm | Fe % | Hg ppm | Mo ppm | Te ppm | WO ₃ % |
|-------------|--------------|---------------|-----------------|--------------|--------|--------|------|--------|------|--------|--------|--------|-------------------|
| SEB10 | 80,81 | 81,31 | 0,50 | 10833 | 3,72 | 1,25 | 0,12 | 88,7 | 1,87 | 0,12 | 11,15 | 29,46 | 2,26 |
| SEB11 | 58,46 | 58,98 | 0,52 | 10839 | 4,24 | 1,01 | 0,13 | 3,70 | 1,49 | 0,01 | 2,12 | 44,05 | 0,00 |
| SEB15 | 34,73 | 35,19 | 0,46 | 10906 | 5,50 | 1,58 | 0,15 | 15,1 | 0,78 | 0,01 | 1,00 | 42,81 | 0,00 |
| SEB21 | 1,70 | 2,45 | 0,75 | 10965 | 27,13 | 4,47 | 0,99 | 9,10 | 0,57 | 0,02 | 1,29 | 364,4 | 0,75 |
| SEB25 | 122,10 | 122,27 | 0,17 | 11017 | 49,39 | 8,66 | 1,00 | 29,8 | 0,88 | 2,34 | 24,93 | 528,0 | 2,79 |
| SEB27 | 71,13 | 71,60 | 0,47 | 11053 | 13,57 | 3,57 | 0,39 | 4,90 | 1,23 | 0,01 | 2,41 | 107,8 | 0,00 |
| SEB100 | 96,41 | 96,91 | 0,50 | 11150 | 23,82 | 7,54 | 0,91 | 27,7 | 0,81 | 1,32 | 14,73 | 273,4 | 0,63 |
| SEB100 | 96,91 | 97,62 | 0,71 | 11300 | 14,75 | 4,43 | 0,49 | 4,10 | 0,80 | 0,01 | 2,77 | 69,96 | 0,02 |
| SEB101 | 110,65 | 111,21 | 0,56 | 11304 | 13,05 | 2,96 | 0,40 | 3,10 | 0,90 | 0,01 | 4,38 | 122,3 | 0,01 |
| SEB101 | 114,93 | 115,38 | 0,45 | 11306 | 11,92 | 3,66 | 0,33 | 396 | 0,66 | 0,01 | 1,60 | 91,60 | 0,01 |
| SEB101 | 121,33 | 122,00 | 0,67 | 11308 | 2,85 | 1,29 | 0,08 | 17,3 | 1,07 | 0,07 | 3,08 | 22,79 | 0,04 |
| SEB45 | 5,45 | 6,40 | 0,95 | 11348 | 9,91 | 1,91 | 0,36 | 106 | 0,96 | 0,01 | 0,67 | 94,93 | 0,00 |
| SEB46 | 9,50 | 10,00 | 0,50 | 11352 | 16,80 | 4,34 | 0,55 | 8,30 | 0,38 | 0,01 | 0,76 | 144,4 | 0,00 |
| SEB107 | 90,63 | 91,00 | 0,37 | 11357 | 23,77 | 3,81 | 0,65 | 4,40 | 0,54 | 0,04 | 5,16 | 221,9 | 0,00 |
| SEB107 | 91,00 | 91,40 | 0,40 | 11358 | 3,36 | 1,20 | 0,10 | 5,90 | 0,90 | 0,01 | 1,20 | 6,49 | 0,01 |
| SEB107 | 94,43 | 95,32 | 0,89 | 11364 | 4,00 | 0,47 | 0,08 | 91,2 | 1,84 | 0,01 | 1,33 | 19,61 | 0,00 |
| SEB112 | 83,67 | 84,50 | 0,83 | 11405 | 18,51 | 4,93 | 0,62 | 29,1 | 0,48 | 1,68 | 147,1 | 185,4 | 2,78 |
| SEB125 | 87,52 | 87,98 | 0,46 | 11476 | 15,16 | 3,20 | 0,50 | 3,50 | 0,49 | 1,93 | 355,3 | 193,1 | 3,43 |

SEB: Sistema Estrutural Bonfim; métodos analíticos/laboratórios: Au: Fire Assay (50g)/Laboratório da Mina Nosso Senhor do Bonfim (LMNSB), Lajes, Rio Grande do Norte; Ag, Bi, Cu, Fe, Hg, Mo, Te: análises por ICP-MS/Laboratório SGS Geosol (Ref. IMS 12B: digestão com HNO₃:HCl); WO₃: análise por método gravimétrico, dissolução com HCl, HNO₃, NH₄Cl e NH₄OH/LMNSB. OP LAB 021; SGS Geosol – Certificado de Análises GQ1004402.

(Tabela 4). A predominância de minerais cálcicos na ganga aponta para um escarnito cálcico e com baixo teor na molécula Tschermark nos anfibólios.

DISCUSSÃO E COMENTÁRIOS

As Minas Bonfim-I e II, incluindo o depósito Bonfim-III, presentes no *trend* estrutural de direção NNE-SSW, correspondem estruturalmente a corpos de escarnitos boudinados que constituem o SEB (Figura 10).

Os furos de sonda que definem o depósito Bonfim-III exibem elevados teores de Au e WO_3 , equivalentes aos de Bonfim-II, além de valores anômalos em Mo, Bi e Te, demonstrando que pode vir a se tornar um depósito viável economicamente, assim como foi a Mina Bonfim-II. Considerando as observações da Mina Bonfim-II, aliadas às informações presentes na literatura sobre Bonfim-I, pode-se tecer alguns comentários.

As estruturas principais dispostas segundo a direção NNE-SSW e verticalizadas encontradas em Bonfim, notadamente as transcorrências, os bandamentos e as foliações, correspondem à estruturação dos xistos Seridó, ou seja, tipicamente brasileira e correlacionável à fase D3 de Jardim de Sá (1984, 1994). Desse modo, em termos estruturais à formação da mineralização de tungstênio (scheelita) e molibdênio no escarnito, estaria associado à fase D3.

A mineralização aurífera na Mina Bonfim-II encontra-se nitidamente controlada por falhas e fraturas de cisalhamento de direção WNW-ESE, constituídas de minerais de bismuto e telúrio preenchendo fraturas junto com prehnita, apresentando caráter tardio, pois cortam a camada principal do escarnito bandado de direção NNE-SSW. Desse modo, as falhas direcionais e as fraturas de cisalhamento podem ser correlacionadas à quarta fase de deformação (D4), definida como uma estrutura de fraca intensidade disposta segundo o *trend* NW-SE (Hackspacher e Sá, 1984).

Tabela 3. Mineraiis metálicos analisados em amostras de escarnitos (Corpo B) da Mina Bonfim-II.

| Análises | Bismuto | Bismutinita | Joseíta | Hedleyita | Molibdenita | Gersdorffita | Pirrotita | Calcopirita |
|----------|---------|-------------|---------|-----------|-------------|--------------|-----------|-------------|
| Bi (wt%) | 99,66 | 80,41 | 83,04 | 77,42 | 0,61 | 0,04 | 0,11 | 0,32 |
| Fe | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,03 | 0,00 | 6,91 | 58,83 | 29,26 |
| Cu | 0,04 | 0,16 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 33,61 |
| Pb | 0,00 | 0,00 | 0,33 | 0,00 | 0,18 | 0,00 | 0,10 | 0,20 |
| Ni | 0,01 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 28,40 | 0,12 | 0,00 |
| Co | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,22 | 0,10 | 0,06 |
| Ag | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| Se | 0,21 | 0,00 | 0,32 | 0,37 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 |
| Te | 0,00 | 0,00 | 10,26 | 21,42 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,03 |
| As | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 47,26 | 0,00 | 0,00 |
| S | 0,00 | 18,73 | 6,44 | 0,00 | 40,18 | 17,92 | 39,98 | 34,98 |
| Mo | 0,00 | 0,37 | 0,00 | 0,00 | 59,88 | 0,00 | 0,00 | 0,04 |
| Au | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total | 99,96 | 99,75 | 100,60 | 99,25 | 100,88 | 100,84 | 99,28 | 98,49 |
| Bi (at%) | 1,00 | 1,97 | 3,99 | 6,82 | nc | Nc | nc | 0,00 |
| Fe | 0,00 | 0,00 | nc | Nc | 0,00 | 0,20 | 1,35 | 0,97 |
| Cu | nc | 0,01 | nc | 0,00 | 0,00 | Nc | nc | 0,98 |
| Pb | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | nc | 0,00 | nc | nc |
| Ni | nc | nc | 0,00 | 0,00 | nc | 0,80 | nc | 0,00 |
| Co | 0,00 | 0,00 | nc | 0,00 | nc | Nc | nc | nc |
| Ag | nc | nc | nc | 0,00 | nc | Nc | 0,00 | 0,00 |
| Se | nc | 0,00 | 0,16 | 0,08 | 0,00 | 0,00 | nc | 0,00 |
| Te | nc | 0,00 | 0,80 | 3,09 | 0,00 | Nc | 0,00 | nc |
| As | nc | 0,00 | 0,00 | Nc | 0,00 | 1,05 | 0,00 | 0,00 |
| S | nc | 2,99 | 2,01 | 0,00 | 2,00 | 0,93 | 1,59 | 2,03 |
| Mo | nc | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,99 | 0,00 | 0,00 | nc |
| Au | nc | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total | 1,00 | 5,00 | 6,97 | 9,99 | 2,99 | 2,98 | 2,94 | 3,98 |

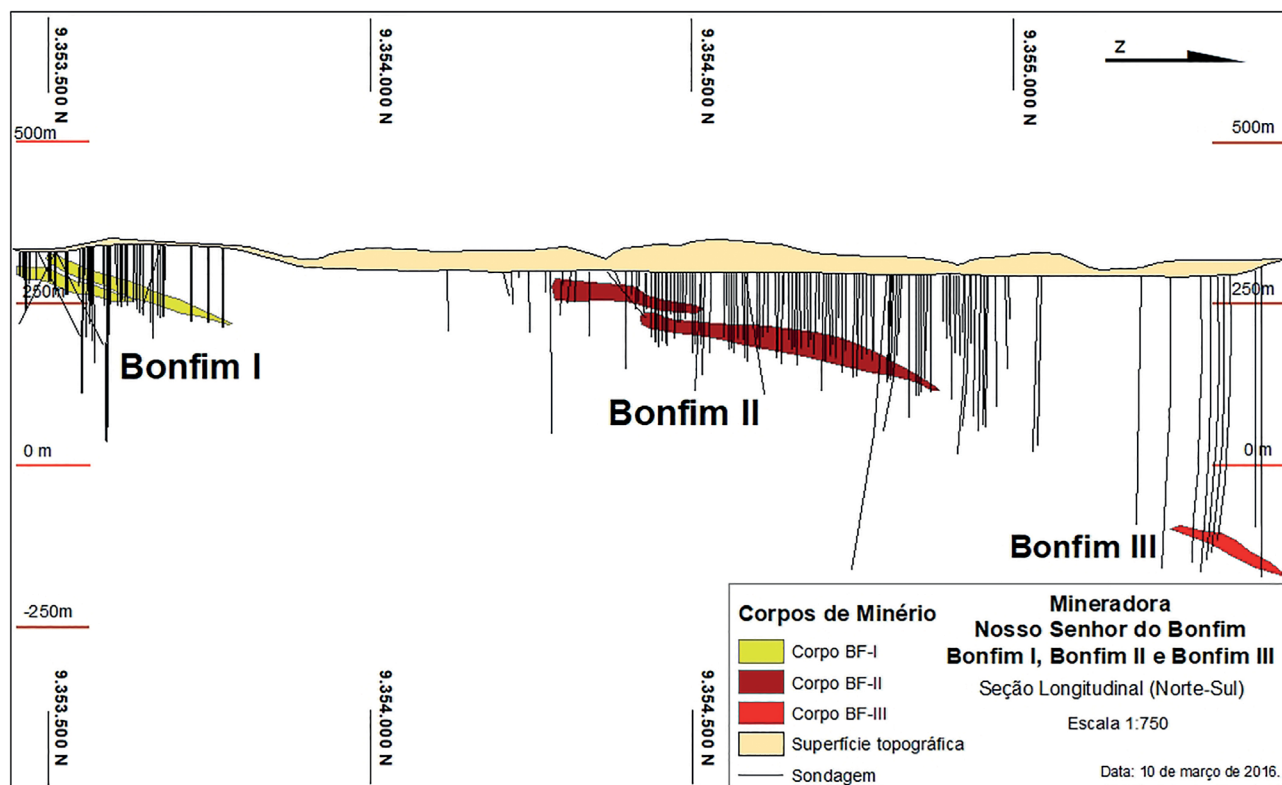
nc: não calculado.

Pegmatitos presentes na região de Bonfim, incluindo diques pegmatíticos mapeados imediatamente a oeste e a sul da Mina Bonfim-II (Figura 3), ocorrem dispostos segundo a direção N60°W/60°NE, correspondendo praticamente à mesma direção em que se encontram as estruturas mineralizadas em ouro e

bismuto na Mina Bonfim-II. Desse modo, considera-se, neste trabalho, que os pegmatitos sejam os responsáveis pela fonte de calor e fluidos que proporcionaram a formação da mineralização aurífera (Figura 11), uma vez que representam o último magmatismo tardi-orogênico na Província Borborema.

Tabela 4. Minerais não metálicos analisados por microsonda eletrônica em amostras de escarnitos (Corpo B) da Mina Bonfim-II.

| Análises | Plagioclásio | K-F | Diopsídio | Actinolita | Tremolita | Zoizita-clinozoizita | Allanita | Titanita | Clorita | Muscovita | Apatita | Calcita |
|--------------------------------|--------------|-------|-----------|------------|-----------|----------------------|----------|----------|---------|-----------|---------|---------|
| SiO ₂ (wt%) | 57,04 | 64,05 | 53,23 | 55,70 | 55,78 | 40,76 | 34,94 | 30,03 | 27,98 | 47,30 | 0,06 | 0,03 |
| TiO ₂ | 0,08 | 0,09 | 0,07 | 0,10 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 35,51 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,00 |
| Al ₂ O ₃ | 27,84 | 19,09 | 0,24 | 2,13 | 0,79 | 35,18 | 25,62 | 2,31 | 21,08 | 38,00 | 0,01 | 0,00 |
| FeO | 0,06 | 0,02 | 6,69 | 9,18 | 4,17 | 0,00 | 6,22 | 0,18 | 12,60 | 0,38 | 0,01 | 0,12 |
| MnO | 0,00 | 0,03 | 0,85 | 0,49 | 0,22 | 0,05 | 0,23 | 0,08 | 0,50 | 0,02 | 0,05 | 0,24 |
| MgO | 0,00 | 0,00 | 14,20 | 18,79 | 22,03 | 0,01 | 0,55 | 0,00 | 25,65 | 0,81 | 0,02 | 0,04 |
| CaO | 5,69 | 0,05 | 24,42 | 12,40 | 13,96 | 23,55 | 19,15 | 29,53 | 0,03 | 0,15 | 55,61 | 55,81 |
| Na ₂ O | 5,65 | 0,20 | 0,09 | 0,20 | 0,00 | 0,30 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 0,01 | 0,01 |
| K ₂ O | 3,74 | 15,77 | 0,00 | 0,09 | 0,07 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 10,64 | 0,01 | 0,01 |
| P ₂ O ₅ | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 42,57 | 0,00 |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,78 | 3,34 | 0,00 |
| Cl | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,06 | 0,00 |
| O=(F+Cl) | | | | | | | | | | -0,33 | -1,41 | |
| Total | 100,15 | 99,34 | 99,78 | 99,08 | 97,26 | 99,85 | 87,72 | 98,34 | 88,00 | 97,91 | 100,35 | 56,26 |



BF: Bonfim.

Figura 10. Seção longitudinal (direção N-S) mostrando os depósitos Bonfim-I, Bonfim-II e Bonfim-III ao longo do trend estrutural NNE, que forma o Sistema Estrutural Bonfim.

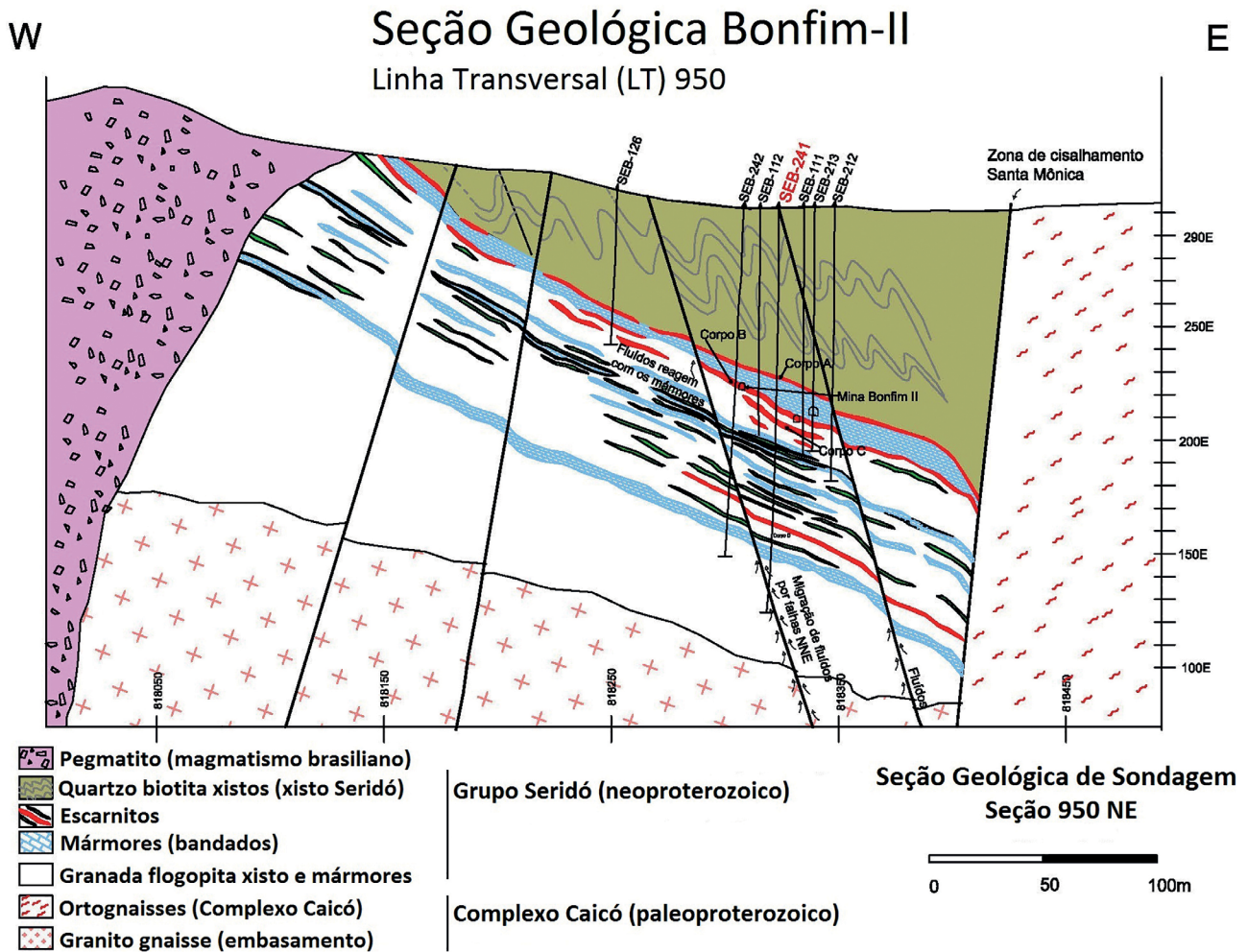
Além disso, a circulação das soluções mineralizantes na família de fraturas de cisalhamento de direção WNW-ESE ocorreria em condições de baixo grau metamórfico, sendo corroborado pela presença de prehnita na ganga das fraturas mineralizadas, a qual indicaria a precipitação do ouro associado a bismuto e telúrio em fácies prehnita-pumpellyita, em regime de caráter predominantemente rúptil, o que corresponderia à segunda fase de mineralização, constituindo o sistema Au-Bi-Te.

Considerando as exposições rochosas na superfície da Mina Bonfim-II, notadamente o pegmatito aflorante a oeste, bem como as descrições de sondagem aliadas ao mapeamento geológico-estrutural das galerias da mina, foi elaborada e interpretada a seção geológica W-E. Essa seção corresponde ao perfil de uma seção geológica do depósito Bonfim-II (Figura 11), mostrando o comportamento dos

escarnitos boudinados em subsuperfície, juntamente com as camadas de mármore, bem como a continuidade e a estruturação dos litotipos em profundidade na unidade de flogopita xistos granadíferos sulfetados, ricos em pirrotita, até o contato com ortognaisses. Estes constituem o embasamento em Bonfim, conforme intersectado por sondagem em um dos furos mais profundos da Mina Bonfim, o SEB-291, com 285,35 m de profundidade.

Xenólitos do xisto da Formação Seridó são encontrados dentro do pegmatito presente na parte oeste do perfil geológico W-E (Figura 11), comprovando com relações de campo que os pegmatitos são mais jovens do que os xistos Seridó, ou seja, que fazem parte de evento magmático ocorrido no fim do Brasiliano.

Observa-se ainda, no perfil geológico, que, além dos escarnitos presentes na mina, podem haver outros corpos



SEB: Sistema Estrutural Bonfim.

Figura 11. Seção geológica interpretada com base em sondagem e mapeamento de galerias da Mina Bonfim-II e também afloramentos em superfície. Perfil mostrando o comportamento dos escarnitos em profundidade e a possível influência do pegmatito na mineralização.

tanto em profundidade quanto lateralmente (por exemplo, a Mina Oiticica a leste de Bonfim), o que deve ser utilizado como um guia para prospecção mineral na região. Além disso, intrusões pegmatíticas forneceriam os fluidos hidrotermais responsáveis pela mineralização aurífera.

Trabalhos anteriores sobre a geologia e o controle estrutural do minério em Bonfim consideravam que o escarnito estivesse dobrado, e que o controle estrutural da mineralização correspondia ao eixo de dobras com baixo ângulo de caimento, segundo a direção NNE (Salim, 1979). Trabalhos mais recentes ainda continuam atribuindo o corpo de minério de Bonfim ao dobramento isoclinal gerado por cisalhamento, mas situam o granito Bonfim, a oeste da mina e aflorante na serra, no núcleo de um grande antifórme (Souza Neto et al., 2008).

O escarnito que constitui o minério de Bonfim é um corpo bandado de direção NNE-SSW com mergulho para SE. Contudo, se fosse uma dobra, conforme citado na bibliografia, ele deveria ocorrer no outro flanco, com mergulho para NW, o que não é observado. Desse modo, com base nas evidências do acompanhamento nas galerias subterrâneas e considerando o mapeamento estrutural da mina, observou-se que o corpo de minério corresponde a um corpo boudinado por cisalhamento.

O arcabouço tectonoestrutural no nordeste da Província Borborema é marcado por extensas zonas de cisalhamento de direção NNE-SSW, que também correspondem a zonas de contato entre unidades litológicas. Na região de Bonfim-II, o contato tectônico entre os ortognaisses do Complexo Caicó e sequência metassedimentar do Grupo Seridó é marcado pela zona de cisalhamento Santa Mônica (Costa e Dantas, 2014), situada imediatamente a leste da Mina Bonfim-II (Figura 11).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O corpo de minério da Mina Bonfim-II (Corpo B) é constituído de um escarnito formado por meio de metassomatismo gerado por fluidos carregados em zonas de cisalhamento. Esses fluidos infiltraram-se ao longo do contato entre tremolita-flogopita mármores e flogopita xistos, provocando alteração e substituição da camada de mármore, propiciando a formação do escarnito. Restaram raras porções reliquias de mármore dolomítico preservado sob a forma de boudins no interior do escarnito estratiforme.

O escarnito foi submetido à deformação em zona de cisalhamento, sendo afetado por processo de boudinagem. O corpo de minério encontra-se cisalhado e estirado com caimento suave (12°) ao longo da direção $N10^\circ E$, que corresponde ao plunge estrutural da mineralização de Bonfim. O processo de formação do escarnito e, conseqüentemente, sua deformação teriam ocorrido sob condições dúcteis em

profundidades da crosta da ordem de 10 km, em fácies xisto verde alto a anfíbolito.

A mineralização de tungstênio (scheelita) e molibdênio (molibdenita) estaria relacionada a esse ambiente profundo, representando a primeira fase de mineralização do sistema (W-Mo), com a formação do escarnito passando por estágios de metassomatismo progressivo e regressivo. Posteriormente, a tectônica teria soerguido a mineralização a níveis crustais mais rasos (< 5 km), favorecendo a mobilização e a deposição de ouro em falhas e fraturas de cisalhamento subverticais de direção NW à WNW, em regime dúctil-rúptil na fácies metamórfica prehnita-pumpellyita. Essas condições estariam relacionadas a um ambiente epitermal, caracterizando a segunda fase de mineralização no sistema Au-Bi-Te.

Os minerais metálicos identificados por minerografia e análises de microsonda eletrônica foram ouro nativo, bismuto nativo, bismutinita, joseíta, molibdenita, pirrotita e calcopirita, além de hedleyita e gersdorffita, estes descritos pela primeira vez no depósito Bonfim, correspondendo a uma contribuição à assembleia de minerais opacos. Os silicatos, por sua vez, provavelmente incluem uma granada cromífera tipo uvarovita.

A mineralização aurífera está intimamente associada a bismuto e telúrio, em falhas e fraturas de cisalhamento sintéticas com terminação em *splay*. Essas fraturas seccionam o bandamento principal do escarnito disposto segundo a direção NNE-SSW, sendo, desse modo, estruturas tardias. A presença de prehnita na composição da ganga das estruturas mineralizadas em ouro mostra que o flossilicato pode ser interpretado como um indicador das condições metamórficas de fácies prehnita-pumpellyita para a segunda fase de mineralização do escarnito.

As fraturas mineralizadas em ouro, compostas de minerais metálicos de bismuto de cor escura, normalmente correspondem a estruturas verticalizadas e espaçadas entre si, podendo expressar, ainda, uma conotação de veios estreitos mineralizados, sob a forma de *sheeted veins*.

Portanto, sugere-se que a formação do escarnito (primeira fase) teria ocorrido durante o pico do metamorfismo em 577 ± 5 Ma (Hollanda et al., 2017). Há datações para leucogranitos variando entre essa idade e 526 ± 8 Ma, e ainda idade Re/Os em molibdenita de Bonfim, mensurada em 524 ± 2 Ma, segundo datações feitas por Hollanda et al. (2017). A evolução dos estágios progressivo e regressivo de metassomatismo levou, no final, a constituir a mineralização W-Mo sob regime de deformação dúctil em fácies xisto verde a anfíbolito. Por outro lado, a mineralização aurífera seria mais jovem, com idade em torno de 524 Ma (Hollanda et al., 2017). Tal fato nos leva ainda a propor que o pegmatito Bonfim, relacionado à fase final do Brasileiro, seja a fonte de fluidos e calor para impulsionar a mineralização aurífera. Essa proposição pode ser corroborada, uma vez

que, na mina, existem falhas e fraturas mineralizadas em ouro e bismuto que também possuem feldspato potássico.

O potencial para exploração mineral em Bonfim é alto, no entanto necessita de investimento em sondagem profunda, tanto ao longo do *trend* estrutural NNE no Sistema Bonfim — sabendo-se que Bonfim-III encontra-se a 400 m de profundidade e possui poucos furos de sonda — quanto no *trend* estrutural para SSW, onde existem anomalias geoquímicas de Au e WO₃ aliadas à presença de afloramentos de escarnitos e mármore. Estes também devem ser investigados com sondagem para melhor definição do potencial.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A. (1977). Províncias estruturais brasileiras. *VIII Simpósio de Geologia do Nordeste*, 363-391. Campina Grande: SBG/Núcleo Nordeste.
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Reviews*, 17(1-2), 1-29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- Angelim, L. A. A., Torres, H. H. F., Santos, C. A., Veiga Junior, J. P., Medeiros, V. C., Nesi, J. R., Mendes, V. A. (2006). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte*. Mapeamento Geológico. Escala 1:500.000. Rio Grande do Norte: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais/CPRM, Ministério das Minas e Energia. Programa Geologia do Brasil, 105p.
- Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W., Nichols, M. C. (1990). *Handbook of Mineralogy, Elements, Sulfides, Sulfoaltes*. Tucson: Mineral Data Publishing. v. 1. 588 p.
- Archanjo, C. J., Viegas, L. G. F., Hollanda, M. H. B. M., Souza, L. C., Liu, D. (2013). Timing of the HT/LP transpression in the Neoproterozoic Seridó Belt (Borborema Province, Brazil): constraints from U-Pb (SHRIMP) geochronology and implications for the connections between NE Brazil and West Africa. *Gondwana Research*, 23(2), 701-704. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.05.005>
- Baumgartner, R., Romer, R. L., Moritz, R., Sallet, R., Chiaradia, M. (2006). Columbite-Tantalite-bearing granitic pegmatites from the Seridó Belt, NE Brazil: Genetic constraints from U-Pb dating and Pb isotopes. *Canadian Mineralogist*, 44(1), 69-86. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.44.1.69>
- Carvalho, O. O. (1990). *Geologia e petroquímica de uma sequência metavulcanossedimentar do nordeste da Faixa Seridó/Sudeste de Lajes, Rio Grande do Norte*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências – Universidade de Brasília.
- Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM). (1971). *Projeto Bonfim*. Relatório Final. Recife: CPRM. 38 p.
- Costa, A. P., Dantas, A. R. (2014). *Carta Geológica e de Recursos Minerais, Folha SB.24-X-D-VI, Lajes - Rio Grande do Norte*. Programa Geologia do Brasil. Escala 1.100.000. Recife: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais.
- Costa, A. P., Dantas, A. R. (2018). *Geologia e Recursos Minerais da Folha Lajes SB.24-X-D-VI*. Estado do Rio Grande do Norte. Programa Geologia do Brasil. Escala 1.100.000. Recife: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. 163 p.
- Dantas, E. L., Van Schmus, W. R., Hackspacher, P. C., Fetter, A. H., Brito Neves, B. B., Cordani, U., Nutman, A. P., Williams, I. S. (2004). The 3.4–3.5 Ga São José do campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Research*, 130(1-4), 113-137. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.11.002>
- Docegeo. (1996). *Avaliação do Potencial Aurífero do Prospecto Bonfim*. Relatório Interno, Distrito Leste. Salvador, Brasil.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge: Cambridge University Press. 272 p.
- Gama Jr., T., Albuquerque, C. A. R. (1985). Petrologia do Grupo Seridó, Currais Novos-Parelhas (RN). *Revista Brasileira de Geociências*, 15(2), 131-138.
- Hackspacher, P. C., Sá, J. M. (1984). Critério lito-estrutural para diferenciação do embasamento Caicó do Grupo Seridó, RN-Brasil. *XXI Simpósio de Geologia do Nordeste*, v. 9, 263-277. Natal: SBG-Núcleo Nordeste. 473 p.
- Hollanda, M. H. B. M., Archanjo, C. J., Souza, L. C., Dunyi, L., Armstrong, R. (2011). Long-lived Paleoproterozoic granitic magmatism in the Seridó-Jaguaribe domain, Borborema Province – NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 32(4), 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.008>
- Hollanda, M. H. B. M., Souza Neto, J. A., Archanjo, C. J., Stein, H., Maia, A. C. S. (2017). Age of the granitic magmatism and the W-Mo mineralizations in skarns of the Seridó belt (NE Brazil) based on zircon U-Pb (SHRIMP) and Re-Os determinations. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.07.011>

- Jardim de Sá, E. F. (1984). Geologia da região do Seridó: reavaliação dos dados. *XI Simpósio de Geologia do Nordeste*. Boletim do Núcleo Nordeste, n. 9, p. 278-296. Natal: SBG-Núcleo Nordeste.
- Jardim de Sá, E. F. (1994). *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan Africana*. Tese (Doutorado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 803 p.
- Jardim de Sá, E. F., Macedo, M. H. E., Legrand, J. M., McReath, I., Galindo, A. C. (1987). Proterozoic granitoids in a polycyclic setting: the Seridó region, NE Brazil. *International Symposium on Granites and Associated Mineralizations*, v. 1, p. 102-110. Salvador: Superintendência de Geologia e Recursos Minerais.
- Jardim de Sá, E. F., Salim, J. (1980). Reavaliação dos conceitos estratigráficos na Região do Seridó (RN-PB). *Mineração e Metalurgia*, 417, 16-28.
- Legrand, J. M., Liegeois, J. P., Deutsch, S. (1991). Datação U/Pb e Rb/Sr das rochas pré-cambrianas da região de Caicó. Reavaliação da definição de um embasamento arqueano. *XIV Simpósio de Geologia do Nordeste*, 12, 276-279. Recife: SGB.
- Leterrier, J., Jardim de Sá, E. F., Bertrand, J. M., Pin, C. (1994). *Ages U-Pb sur zircon de granitoïdes "brasilianos" de la ceinture du Seridó (Province Borborema, NE Brésil)*. Paris: Académie des Sciences. Série II. v. 318.
- Lima, E. A. M. (ed.). (1980). *Projeto Scheelita Seridó*. Relatório final e mapas. v. 1-35. Recife: Departamento Nacional de Produção Mineral/DNPM e Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/9240>>. Acesso em: 20 maio 2018.
- Lima, E. S. (1986). *Metamorphism and tectonic evolution in the Seridó region, northeastern Brazil*. Tese (PhD). Los Angeles: University of California.
- Medeiros, V. C., Nascimento, M. A. L., Galindo, A. C., Dantas, E. L. (2012). *Augen gnaisses riacianos do Domínio Rio Piranhas-Seridó, Província Borborema, Nordeste do Brasil*. *Geologia USP. Série Científica*, 12(2), 3-14. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2012000200001>
- Nascimento, M. A. L., Galindo, A. C., Medeiros, V. C. (2015). Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current Knowledge. *Journal of South American Earth Science*, 58, 281-299. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.008>
- Salim, J. (1979). *Geologia e controles das mineralizações scheelitíferas da região da Serra do Feiticeiro e Bonfim/Lajes, Rio Grande do Norte-Brasil*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Souza, L. C., Martins Sá, J., Legrand, J. M., Maia, H. N., Melo, T. F., Magalhães, W. G., Cocentino, W. M., Menezes, C. P., Fillippi, R. (2017). *Geologia e Recursos minerais da Folha Pau dos Ferros SB.24-Z-A-II*. Escala 1:100.000. Estado do Rio Grande do Norte. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil/UFRN. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17717>>. Acesso em: 21 maio 2018.
- Souza Neto, J. A., Legrand, J. M., Volfinger, M., Pascal, M. L. (1998). Geochemistry of the ore fluids in the Bonfim and Itajubatiba gold skarn deposits, Northeastern Brazil: a PIXE Method study. *Mineralogical Magazine*, 62A(3), 1432-1433. <https://doi.org/10.1180/minmag.1998.62A.3.84>
- Souza Neto, J. A., Legrand, J. M., Volfinger, M., Pascal, M. L., Sonnet, P. (2008). W-Au skarns in the Neo-Proterozoic Seridó Mobile Belt, Borborema Province in northeastern Brazil: an overview with emphasis on the Bonfim deposit. *Mineralium Deposita*, 43(2), 185-205. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0155-1>
- Van Schmus, W. R., Brito Neves, B. B., Williams, I. S., Hackspacher, P. C., Fetter, A. H., Dantas, E. L., Babinski, M. (2003). The Seridó Group of NE Brazil, a late neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in west Gondwana: insights from SHRIMP U-Pb detrital zircon ages and Sm-Nd crustal residence (TDM) ages. *Precambrian Research*, 127(4), 287-327. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00197-9)