

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Mineralização de W associada a evolução do Leucogranito
Inhandjara na Província Magmática de Itu, SP**

MONOGRAFIA 2023-2024
TF-24/42

Aluno: Rodrigo Cordeiro de Almeida, N° USP: 11812462
Orientadora: Profa. Dra. Lucelene Martins (IGc-USP)
Coorientador: Dr. Frederico Meira Faleiros (IGc-USP)

São Paulo, Novembro, 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido por meio do projeto coordenado pelo Prof. Valdecir de Assis Janasi (FAPESP 19/17550-0). Agradeço à Prof^a Lucelene Martins pelo respeito, compreensão e apoio durante a orientação, e ao Prof. Frederico Faleiros pela coorientação e todo o suporte na obtenção e interpretação dos dados de inclusões fluidas. Agradeço também ao Prof. André Pestilho pelo suporte nas análises Raman. Meus agradecimentos ao colega Arthur Rodrigues pelo auxílio na obtenção e interpretação dos dados de inclusões fluidas, aos técnicos Marcus (IGc) pelo apoio nas análises de microsonda e Vinícius pelas análises de LA-ICP-MS, assim como à equipe do LCT (POLI-USP) pelo auxílio nas análises de MEV e microfluorescência de raios-X. Finalmente, agradeço à minha família e amigos por todo o carinho e apoio.

RESUMO

O leucogranito Inhandjara é um stock granítico diferenciado de idade Ediacarana, associado à percolação de fluidos hidrotermais que formaram veios mineralizados em wolframita e cassiterita nas rochas encaixantes. Este estudo busca elucidar os processos magmáticos e hidrotermais que resultaram em tais mineralizações. Foram realizadas análises petrográficas, microtermométricas e de espectroscopia Raman em inclusões fluidas presentes em cristais de topázio do veio mineralizado (IPV-15D), além de análises semi-quantitativas e quantitativas de elementos maiores em mica, wolframita e cassiterita usando EDS, WDS e LA-ICP-MS para elementos traço. As inclusões fluidas no topázio revelam um sistema hidrotermal dinâmico e heterogêneo, com a presença de duas fases fluidas de salinidades distintas ao longo da cristalização e trajetórias evolutivas distintas, refletindo variações nas condições de cristalização e na composição química ao longo do aprisionamento do fluido. A mineralização de wolframita ocorre em um intervalo de salinidade entre 0 e 15 wt.% NaCleq. e temperatura de homogeneização entre 200 e 330 °C. Os dados de química mineral indicam um sistema hidrotermal altamente evoluído e rico em flúor. As micas da matriz brechada foram classificadas como fengitas, enriquecidas em W, enquanto os topázios e cassiteritas apresentam zoneamento oscilatório nas imagens de catodoluminescência. A wolframita foi caracterizada como hubnerita (MnWO_4) com base na relação MnO/FeO, apresentando um padrão de terras raras enriquecido em ETR pesados (ETRP) e empobrecido em ETR leves (ETRL), com anomalia negativa de Eu. Embora os dados indiquem um ambiente hidrotermal extremamente evoluído, os processos identificados ao longo das trajetórias evolutivas dos fluidos apontam para a atuação de diferentes processos como mistura e imiscibilidade de fluidos aquosos de salinidades distintas, que afetam diretamente a solubilidade do W, e podem ter sido responsáveis pela precipitação da wolframita no veio.

Palavras-chave: Leucogranito Inhandjara, Mineralização hidrotermal, Inclusões fluidas, Wolframita, Elementos traço

ABSTRACT

The Inhandjara leucogranite is a differentiated Ediacaran granite stock associated with the percolation of hydrothermal fluids that formed veins mineralized with wolframite and cassiterite within the host rocks. This study aims to elucidate the magmatic and hydrothermal processes that resulted in these mineralizations. Petrographic, microthermometric, and Raman spectroscopy analyses were conducted on fluid inclusions in topaz crystals from the mineralized vein (IPV-15D), along with semi-quantitative and quantitative analyses of major elements in mica, wolframite, and cassiterite using EDS, WDS, and LA-ICP-MS for trace elements. The fluid inclusions in topaz reveal a dynamic and heterogeneous hydrothermal system, with the presence of two fluid phases of distinct salinities throughout crystallization and distinct evolutionary trajectories, reflecting variations in crystallization conditions and chemical composition during fluid entrapment. Wolframite mineralization occurs within a salinity range of 0 to 15 wt.% NaCl_{eq.} and homogenization temperatures between 200 and 330 °C. Mineral chemistry data indicate a highly evolved, fluorine-rich hydrothermal system. Micas from the brecciated matrix were classified as fengites, enriched in W, while topaz and cassiterite crystals exhibit oscillatory zoning in cathodoluminescence images. Wolframite was characterized as hübnerite (MnWO₄) based on the MnO/FeO ratio, displaying a rare earth element (REE) pattern enriched in heavy REEs (HREE) and depleted in light REEs (LREE), with a negative Eu anomaly. Although the data indicate an extremely evolved hydrothermal environment, the processes identified along the fluid evolutionary trajectories suggest the influence of various mechanisms, such as fluid mixing and immiscibility between aqueous fluids of distinct salinities, which directly affect W solubility and may have been responsible for wolframite precipitation in the vein.

Keywords: Inhandjara leucogranite, Hydrothermal mineralization, Fluid inclusions, Wolframite, Trace elements

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METAS E OBJETIVOS.....	2
3. TRABALHOS PRÉVIOS.....	2
3.1 O granito Inhandjara e a mineralização de W-Sn associada.....	2
3.2 Análise de Inclusões fluidas.....	4
3.3 Análise de elementos traço em mica e wolframita.....	6
3.4 Solubilidade de W em fluidos hidrotermais.....	6
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	7
4.1 Materiais.....	7
4.2 Microtermometria.....	7
4.3 Espectroscopia Raman.....	8
4.4 Espectroscopia de Microfluorescência de Raios X.....	9
4.5 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura.....	10
4.6 Composição de elementos maiores em mica por Microsonda Eletrônica.....	10
4.7 Análise de elementos traços por LA-ICP-MS.....	11
5. RESULTADOS OBTIDOS.....	12
5.1 Mapeamento e microtermometria de inclusões fluidas.....	12
5.1.1 Caracterização das inclusões.....	15
5.1.2 Análise estatística de dados de salinidade e Temperatura de homogeneização das inclusões fluidas.....	19
5.1.3 Perfis de variação de salinidade e Th.....	21
5.2 Espectroscopia Raman.....	27
5.2 Química e Textura Mineral.....	29
5.2.1 Topázio.....	29
5.2.2 Mica.....	31
5.2.3 Cassiterita.....	34
5.2.4 Wolframita.....	37
5.3 Caracterização Textural e Mineralógica das Amostras.....	39
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	40
6.1 Petrografia e microtermometria de inclusões fluidas.....	40
6.2 Caracterização e interpretação das fases minerais.....	43
7. CONCLUSÕES.....	43
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

Granitos altamente diferenciados e especializados são amplamente reconhecidos como associados à mineralização de metais raros (Lehmann, 2021). A mineralização de Sn-W comumente ocorre em *greisen* e/ou em veios hidrotermais, que podem estar localizados tanto no interior do corpo granítico quanto nas rochas encaixantes circundantes (Audétat et al., 2000a). Consequentemente, a investigação das mineralizações hidrotermais nesses corpos graníticos é uma área de grande interesse nas geociências, abrangendo estudos sobre a evolução magmática e os processos que conduzem à concentração de metais de importância econômica. A formação de veios mineralizados e os processos de alterações hidrotermais associados ainda não são completamente compreendidos e são frequentemente investigados por meio de uma variedade de técnicas petrográficas e geoquímicas (e.g., Hannah e Stein, 1990; Saad et al., 1996; Candela, 1997; Pereira et al., 2008). Essas abordagens permitem desvendar as condições de formação e evolução dos sistemas hidrotermais. Em particular, a análise de inclusões fluidas é essencial, fornecendo dados importantes sobre as condições de aprisionamento do fluido durante a evolução magmática e hidrotermal, além de sua relação com a mineralização de metais raros, como tungstênio e estanho (Roedder, 1984). A classificação das inclusões e a análise de seus parâmetros termodinâmicos, realizadas por meio de microtermometria, permitem observar as mudanças de fase das inclusões sob variação de temperatura (Goldstein e Reynolds, 1994; Roedder, 1984). Compreender as propriedades do fluido durante a cristalização é fundamental para decifrar as condições de deposição de minérios provenientes de processos metassomáticos e para relacioná-los à evolução do corpo hospedeiro. Além disso, a análise de elementos traço em fases minerais associadas ao hidrotermalismo (e.g., quartzo, topázio, micas, wolframita) contribui significativamente para elucidar os processos genéticos de formação e os vetores das mineralizações (e.g., Audétat et al., 2000b; Monnier et al., 2018).

O leucogranito Inhandjara, caracterizado por sua greisenização fissural e associado a veios de quartzo-topázio mineralizados em hübnerita (wolframita rica em Mn) e cassiterita (minério de Sn), ilustra bem esses processos (Araújo, 2018). Este projeto dá continuidade aos estudos realizados por Araújo (2018), investigando a mineralização de W-Sn e sua possível relação à evolução magmato-hidrotermal do Leucogranito Inhandjara. Aqui, são incluídas microtermometria em inclusões fluidas, além de outras técnicas avançadas como espectroscopia Raman, catodoluminescência e análises de elementos traço em mica e wolframita por LA-ICP-MS, com o objetivo de aprofundar a compreensão da mineralização de W-Sn possivelmente associada à evolução dos granitos da Província Magmática de Itú.

2. METAS E OBJETIVOS

O objetivo deste projeto foi expandir o conhecimento sobre os processos magmáticos e hidrotermais associados à mineralização de W-Sn no contexto do Leucogranito Inhandjara. As metas específicas envolveram a aplicação de técnicas avançadas para caracterizar a fase fluida, os processos metassomáticos e a evolução do sistema de mineralização. Para isso, foram realizadas análises petrográficas detalhadas das inclusões fluidas em cristais de topázio, complementadas por dados microtermométricos e espectroscopia Raman das inclusões na amostra do veio mineralizado (IPV15D). Além disso, foram conduzidas análises composicionais e de imageamento por microsonda eletrônica, MEV-EDS, e catodoluminescência dos minerais presentes no veio hidrotermal mineralizado e no topázio granito (amostra IPV35A), e de elementos traços por LA-ICP-MS em mica, wolframita e cassiterita do veio. Essas técnicas foram essenciais para investigar a evolução da fase fluida e dos processos de mineralização. O estudo integrou novos dados às de Araújo (2018) e Araújo et al. (2020), proporcionando um contexto mais amplo para a evolução geológica do Leucogranito Inhandjara e da Província Magmática de Itu.

3. TRABALHOS PRÉVIOS

3.1 O granito Inhandjara e a mineralização de W-Sn associada

O leucogranito Inhandjara é um pequeno e diferenciado stock Ediacarano (~570 Ma) que forma a borda nordeste do Batólito de Itu, na porção leste do estado de São Paulo. Esse corpo aflora como granitos hololeucocráticos, separados das outras unidades do batólito por um cinturão de gnaisses do embasamento (Janasi et al, 2009; Araújo et al., 2020). É composto por dois litotipos principais: (1) biotita monzogranito inequigranular a porfirítico, com megacristais de feldspato potássico em uma matriz de granulação média a grossa; e (2) álcali-feldspato granito equigranular médio a fino, contendo topázio, o qual é definido como a fácies mais evoluída do granito (Fig.1; Araújo et al., 2020).

Esse corpo granítico exhibe zonas de alteração hidrotermal associadas à exsolução de fluidos, com eventos de metassomatismo alcalino pervasivo e a greisenização fissural como os mais expressivos da região. Esses processos afetam tanto o granito quanto os gnaisses encaixantes, frequentemente acompanhados por veios de quartzo e topázio. Embora muitos desses veios sejam estéreis, alguns, ricos em topázio, contêm wolframita e cassiterita. A silicificação é também observada, mas é limitada espacialmente (Fig. 2; Araújo, 2018).

As rochas encaixantes desse stock granítico são gnaisses migmatíticos paraderivados da unidade superior da Nappe Socorro-Guaxupé (Campos Neto e Caby, 2000), que sofreram um grau variado de alteração hidrotermal, caracterizada por intensa greisenização intimamente associada a veios de quartzo, topázio e mica. Estes gnaisses hidrotermalizados e veios hospedam a mineralização de W-Sn, que foi explorada durante as décadas de 40 e

60 na antiga Mina de Inhandjara. A rocha apresenta bandamento composicional, intercalando finas lentes quartzosas granoblásticas com bandas lepidoblásticas milimétricas contendo biotita e muscovita. Localmente, essa variação composicional pode atuar como armadilhas para a mineralização (Araújo, 2018).

A análise de elementos menores e traços em zircão e biotita do álcali-feldspato granito sugere que este pode ser a fonte dos metais raros. No entanto, a cassiterita e a wolframita estão ausentes nesse granito, encontradas somente em sistemas de veios nos paragneisses encaixantes. Esse fenômeno pode ser atribuído à remobilização dos metais por fluidos exsolvidos do magma, o que impediu a deposição dessas fases diretamente no granito (Araújo et al., 2020).

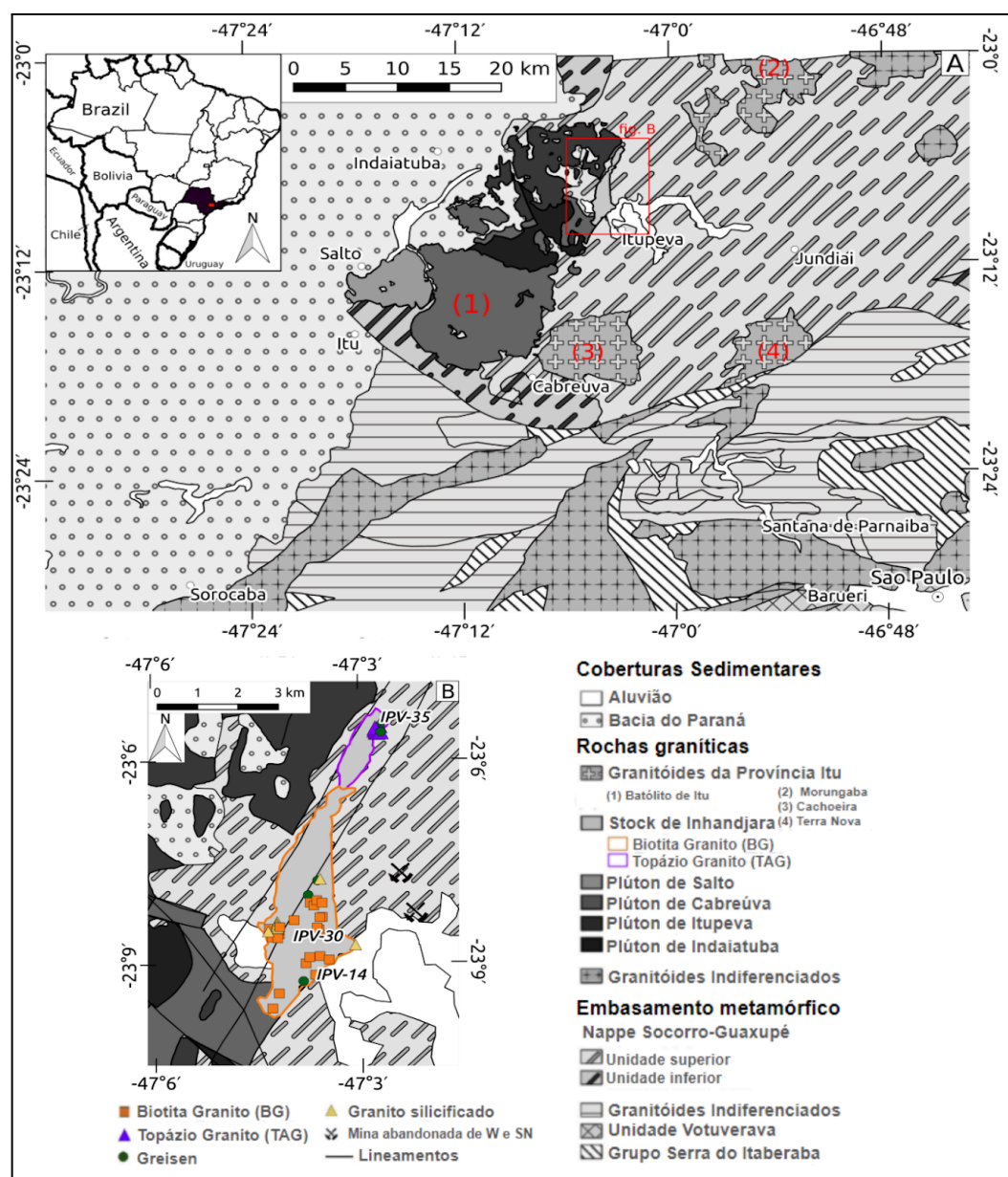


Figura 1. (A) Mapa geológico regional com a delimitação dos litotipos presentes na área de estudo e unidades geológicas próximas. (B) Mapa de detalhe do Stock de Inhandjara, fácies internas e localização de amostras (extraído de Araújo et al., 2020; traduzido e recortado para simplificação).

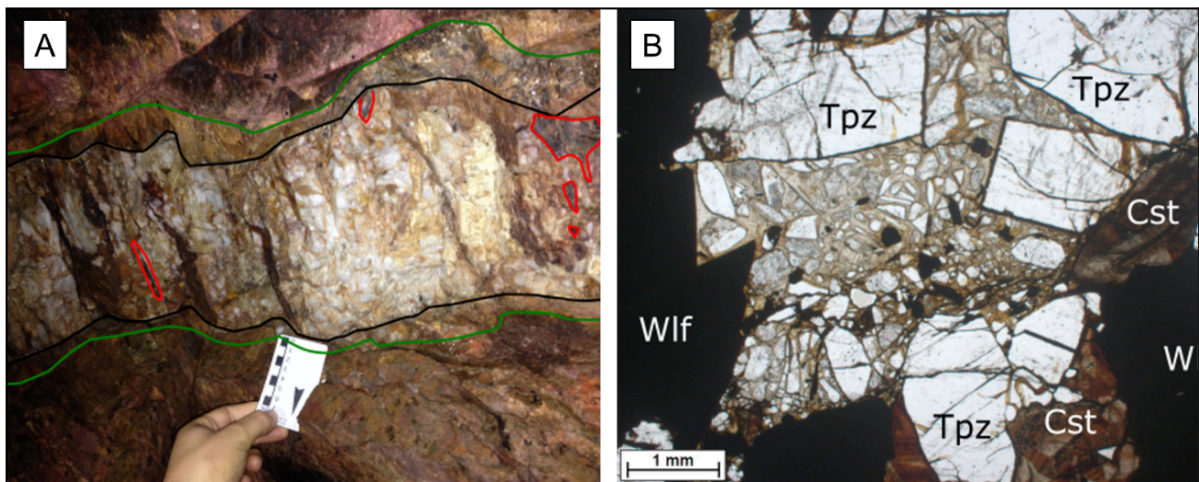


Figura 2. (A) Veio de quartzo-topázio (contorno em linha preta) mineralizado em wolframita (contorno em linha vermelha) circundada por uma espessa franja micácea (linha verde). (B) Wolframita circundada por cassiterita, envolvendo topázio euédrico, adjacente a uma matriz brechada preenchida por sericita (amostra IPV15D em lâmina petrográfica com polarizadores cruzados). As imagens e descrições foram extraídas diretamente de Araújo (2018) e as abreviações utilizadas foram retiradas de Whitney e Evans (2010).

3.2 Análise de Inclusões fluidas

A etapa de petrografia é fundamental para atribuir contexto geológico às inclusões fluidas, uma vez que elas podem se formar de maneira contemporânea ou posterior ao cristal hospedeiro. Dessa forma, um único cristal pode conter inclusões de características e momentos de formação distintos, que devem ser avaliadas e agrupadas em assembleias de acordo com o período de aprisionamento. Esse procedimento é fundamental para avaliar se as inclusões podem contribuir efetivamente para a resolução da questão científica proposta (Goldstein, 2003).

As inclusões são classificadas segundo dois critérios principais (Goldstein, 2003; Fig 3): o contexto de formação e o número de fases identificáveis. Quanto ao primeiro critério, as inclusões são definidas como:

- **Primárias (PR):** formadas cogeneticamente ao mineral, distribuem-se paralelamente às faces de crescimento do cristal.
- **Secundárias (SE):** formadas após a cristalização do mineral, em fraturas e zonas de deformação, criando trilhas nas zonas de crescimento mais externas do mineral.
- **Pseudosecundárias (PS):** formadas durante o processo de cristalização, mas em fraturas restritas entre as zonas de crescimento do mineral.

Nos estudos de inclusões fluidas, a discriminação detalhada dos eventos de aprisionamento é essencial. Grupos distintos de inclusões quando associados

petrograficamente, são denominados de assembléias de inclusões fluidas (FIAs, do inglês 'Fluid Inclusion Assemblages; Goldstein e Reynolds, 1994). Cada FIA representa a máxima resolução temporal do momento de aprisionamento dos vacúolos (Goldstein, 2003).

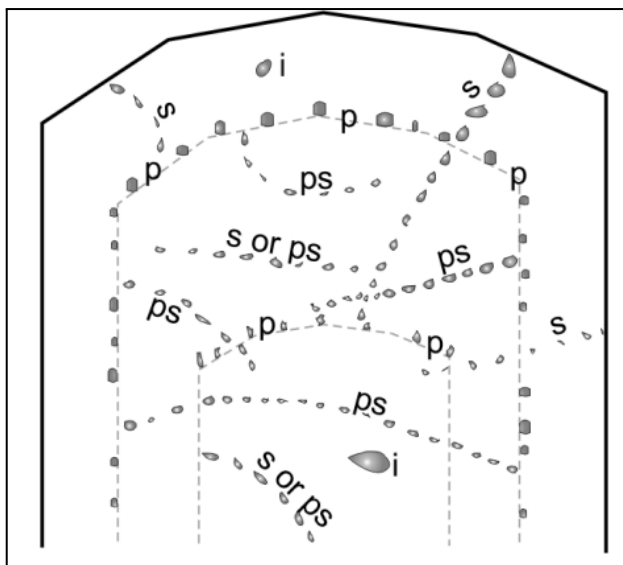


Figura 3. Distribuição espacial das inclusões de acordo com Goldstein (2003). Este esquema ilustra a disposição das inclusões fluidas no mineral hospedeiro, refletindo as diferentes etapas de aprisionamento e formação. Retirado de Goldstein (2003).

A espectroscopia Raman permite identificar qualitativamente fases gasosas e líquidas, bem como minerais contidos nas inclusões ou hospedeiros. Em alguns casos, análises quantitativas são possíveis, como a determinação do percentual molar de misturas gasosas e a concentração de solutos em fluidos aquosos. No entanto, a interferência de fluorescência pode obscurecer o espectro Raman, representando uma limitação importante que deve ser considerada ao selecionar amostras para estudo (Frezzotti, 2012; Burruss, 2003).

Os fluidos mineralizantes de W pertencem geralmente ao sistema de $\text{NaCl-H}_2\text{O} \pm \text{CO}_2$ (Naumov et al., 2011; Wood e Samson, 2000). Inclusões fluidas contendo CO_2 foram identificadas em wolframita de alguns depósitos de tungstênio (e.g., Chen et al., 2018; Pan et al., 2019), embora o teor exato de CO_2 ainda seja pouco conhecido. Estudos de Wood e Samson (2000) sugerem que a fração molar de CO_2 nas inclusões fluidas varia tipicamente entre 0 e 0,1 (Liu e Xiao, 2020).

Em profundidade, os fluidos hidrotermais são aprisionados em um estado supercrítico e relativamente homogêneo (Roedder e Bodnar, 1997; Goldstein e Reynolds, 1994). Após o aprisionamento, o fluido esfria, estabiliza-se e passa por mudanças de fase, reguladas por princípios termodinâmicos, particularmente pela diminuição da pressão e temperatura em um sistema de volume constante e fechado. Essas mudanças podem resultar na formação de múltiplas fases fluidas dentro da inclusão, que se estabilizam à temperatura ambiente (Roedder, 1984). Em depósitos de minério, processos físicos como a separação de fases e a mistura de fluidos são essenciais para a concentração econômica de metais, sendo

frequentemente atribuídas a processos de ebulição e/ou efervescência em sistemas ricos em voláteis, bem como à mistura de fluidos (Wilkinson, 2001).

Bodnar et al. (2014) compilam dados de 2000 análises de inclusões em 72 depósitos de W-Sn. Os autores destacam que a qualidade dos dados pode estar comprometida devido ao uso de diferentes metodologias de análise e à falta de interpretação dos dados de inclusões fluidas. Muitas vezes, as inclusões analisadas não são agrupadas em assembléias de inclusões, conforme recomendado por Goldstein e Reynolds (1994), e, frequentemente não há fotomicrografias das inclusões, o que pode levar a falhas na distinção entre inclusões primárias e secundárias e gerar confusões sobre a evolução do sistema ao não considerar os critérios petrográficos.

3.3 Análise de elementos traço em mica e wolframita

Segundo Heinrich (1990), em muitos depósitos de veios hidrotermais, especialmente aqueles hospedados em hornfels semipelíticos, a alteração fica restrita a estreitas zonas onde os feldspatos são completamente substituídos por muscovita (Eadington e Kinealy, 1983; Andrew e Heinrich, 1984). Esse fenômeno, aliado às texturas de veios que indicam sobrecrecimentos sucessivos de minerais hidrotermais nas paredes, sugere que a interação química entre os fluidos dos veios com as rochas feldspáticas pode ser limitada pela baixa permeabilidade das rochas encaixantes (Heinrich e Eadington, 1986).

De acordo com Chen et al. (2020), micas são alguns dos minerais prevalentes em granitos e veios de quartzo contendo wolframita; enquanto a wolframita é um mineral de tungstênio de grande importância, formado em ambientes hidrotermais associados à greisenização. Em escala de depósito, as concentrações mais elevadas de tungstênio estão frequentemente associadas a franjas de mica nas bordas dos veios. A composição dessas micas, especialmente em elementos traço, pode fornecer informações valiosas sobre a origem dos fluidos a partir dos quais precipitam. (Chen et al., 2020).

A análise de elementos traço em mica e wolframita, no contexto de veios mineralizados, contribui para o entendimento da origem dos fluidos hidrotermais, das condições redox desses fluidos, da sobreposição de eventos de alterações hidrotermais e interações significativas entre o fluido e a rocha encaixante (e.g., Yang et al., 2019; Zhang et al., 2018).

3.4 Solubilidade de W em fluidos hidrotermais

De acordo com Liu e Xiao (2020), a Wolframita ($(\text{Mn,Fe})\text{WO}_4$) é uma solução sólida entre hubnerita (MnWO_4) e Ferberita (FeWO_4). A Ferberita é amplamente documentada nos principais depósitos de W ao redor do mundo, como os depósitos do sul da China, o depósito de Panasqueira de Portugal, vários depósitos de tungstênio do Maciço Central Variscano na França, no Maciço Ibérico na Espanha, e na região central de Ruanda. Esses depósitos apresentam modelos termodinâmicos que fornecem restrições quantitativas sobre

a solubilidade desta variedade de wolframita. Por outro lado, a precipitação da variedade mais rica em Mn, a hubnerita, depende fortemente de uma fase fluida rica em Mn (MnCl_2^0). Os principais mecanismos que favorecem a deposição das duas espécies incluem o aumento do pH e a diminuição da temperatura e salinidade da fase fluida. Adicionalmente, a maior solubilidade dessas fases em fluidos alcalinos indica que sua deposição está mais comumente associada a estágios fluidos tardios em relação ao magmatismo.

Segundo Higgins (1985), aumento no pH do fluido não apenas representa um dos principais mecanismos de deposição da wolframita em fluidos de baixa salinidade e pobres em CO_2 , mas também é um fator importante para a mudança da composição da wolframita de ferberita para hubnerita ao longo da evolução do fluido.

De acordo com Ni et al., (2022), outros processos que promovem a deposição de wolframita em fluidos de estágios tardios são movidos por alterações na fase fluida, como efervescência, imiscibilidade e perda de gases acidificantes, causado por decompressão do sistema. Esses processos aumentam o pH da solução e reduzem a solubilidade de W, favorecendo sua deposição.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

As análises de química e imageamento mineral foram realizadas em seções delgadas polidas de duas amostras principais: o topázio granito Inhandjara (IPV-35A) e o veio hidrotermal de topázio, wolframita, cassiterita e quartzo, localizado na rocha encaixante ao granito (IPV-15D). Essas amostras já haviam sido previamente estudadas por Fernando Prado Araújo em sua dissertação de mestrado (2018) e em artigo científico subsequente (Araújo et al., 2020). Para as análises de microtermometria, foram utilizados dois fragmentos de seção bipolida da amostra IPV-15D, em que foram selecionados dois cristais de topázio (TPZ-I e TPZ-II).

4.2 Microtermometria

As análises de inclusões fluidas foram realizadas no laboratório de inclusões fluidas (LIF), parte do Núcleo de Apoio à Pesquisa (NAP) Geoanalítica, do Instituto de Geociências (IGc) da Universidade de São Paulo (USP), sob supervisão do Prof. Frederico Meira Faleiros. Utilizou-se um microscópio petrográfico OLYMPUS BX-51-POL-1, com lentes objetivas de aumento de 5x, 10x e 50x, acoplado a uma câmera Nikon para registro de imagens. A microtermometria foi conduzida com o sistema Linkam THMS G600 e controlador de temperatura T96-LinkPad, permitindo controle preciso do resfriamento com nitrogênio líquido e aquecimento por resistência, acoplado a uma platina resistente à variação de temperatura. O software Linksys32 foi empregado para monitorar e ajustar as taxas de variação de temperatura. O equipamento utilizado está ilustrado na Figura 4.

O mapeamento inicial consistiu em selecionar campos com condições analíticas favoráveis, classificar as inclusões com base em características como ocorrência, forma, origem, tamanho, número de fases e volume relativo de gás e, por fim, numerá-las.

A técnica de microtermometria, que permite determinar as variações de fase das inclusões fluidas ao submeter as amostras a temperaturas que variam de -196°C a 600°C , possibilitou obter diversos parâmetros térmicos. Durante o resfriamento, foram determinadas as temperaturas de congelamento total (T_c), ponto eutético (T_e) e fusão total do gelo (T_{fg}) para as inclusões aquosas. Durante o aquecimento, foi determinada a temperatura de homogeneização (T_h) para as mesmas inclusões.

Os dados microtermométricos foram processados com o software Bulk® (Bakker, 2003), que, a partir de valores de T_h e T_{fg} obtidos e das equações de estado definidas para o sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ (Bodnar, 1993; Archer 1992; Zhang e Frantz 1987), fornece valores de salinidade, densidade e outros parâmetros físico-químicos do fluido aprisionado.

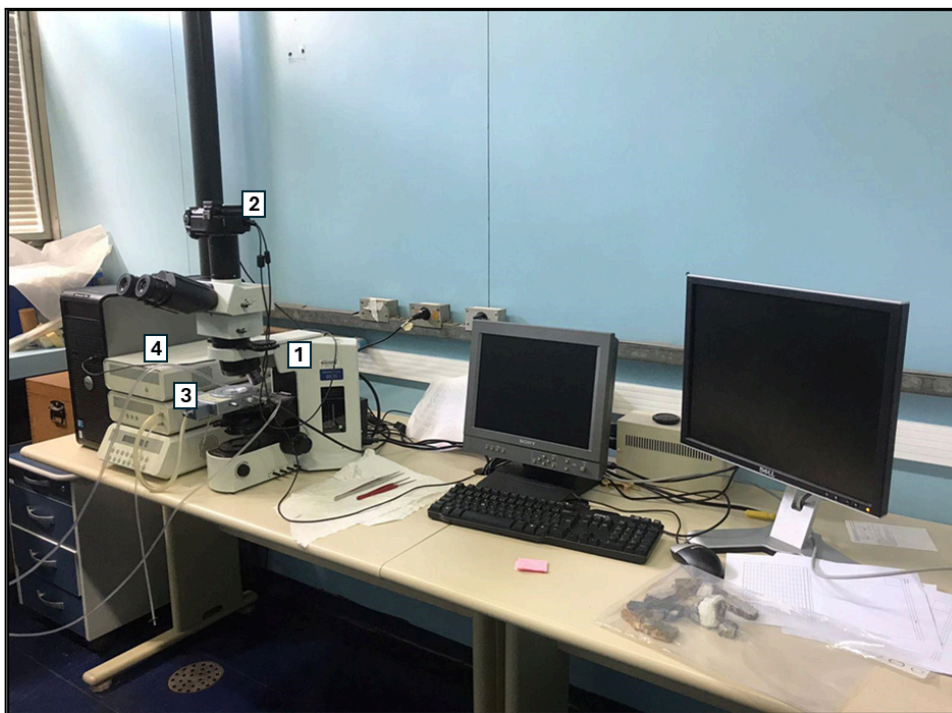


Figura 4. Microscópio petrográfico OLYMPUS BX-51-POL-1 (1), acoplado com uma câmera Nikon (2), um equipamento de microtermometria Linkam THMS G600 (3) e um controlador de temperatura T96-LinkPad (4), utilizado nas etapas de mapeamento, classificação e microtermometria de inclusões. Equipamento instalado no laboratório de inclusões fluidas (LIF) da NAP Geoanalítica – IGc-USP.

4.3 Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman foi empregada para analisar as inclusões fluidas presentes em um fragmento de seção bipolar da amostra do veio mineralizado (IPV-15D), previamente utilizado nas análises de microtermometria, bem como em uma inclusão presente em lâmina petrográfica de $30\ \mu\text{m}$ de espessura da mesma amostra. A técnica consiste em medir a dispersão energética do feixe de luz de um laser monocromático que

interage inelasticamente com a matéria da amostra. Essa interação gera o espalhamento Raman, onde padrões vibracionais distintos para diferentes grupos moleculares refletem o estado energético específico da molécula analisada (Burke, 2001). A partir do espectro obtido, é possível estimar a composição de cada gás presente na inclusão fluida.

As análises Raman foram realizadas no laboratório Geofluid - Laboratório de Caracterização de Fluidos em Sistemas Geológicos, do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do IGc-USP, sob a supervisão do Prof. André Luiz Pestilho. Foi utilizado um espectrômetro Raman Horiba XploRA Plus, acoplado a um microscópio Olympus BX43 e equipado com um laser de estado sólido de diodo, com comprimentos de onda de 785 nm e 532 nm, e potência máxima de 100 mW. As análises de topázio foram realizadas utilizando uma objetiva de 100x, potência de 100% e um tempo de aquisição total de 1 minuto. Para as inclusões fluidas, foi utilizado o laser de 532 nm com potência ajustada para 25% e tempo de aquisição de 1 minuto e 55 segundos. A Figura 5 apresenta o equipamento utilizado para estas análises.

A Figura 5 ilustra o equipamento utilizado para essas análises.

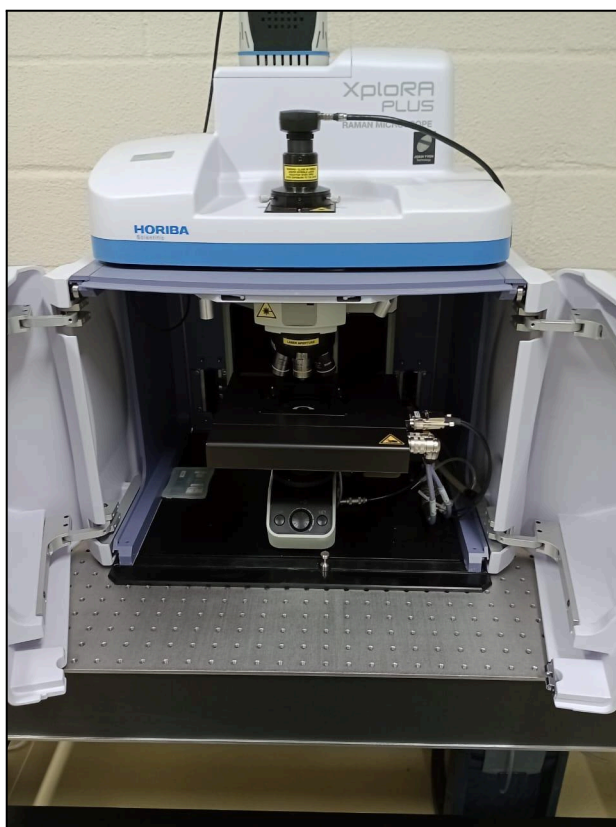


Figura 5. Espectrômetro Raman do laboratório Geofluid do IGc-USP utilizado nas análises das inclusões da amostra IPV-15D. Para maiores detalhes do equipamento ver o texto.

4.4 Espectroscopia de Microfluorescência de Raios X

Para as análises de composição e mapeamento de fases minerais, foi utilizado o espectrômetro de microfluorescência de raios X (μ -XRF) Bruker M4 Tornado Plus, localizado

no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) da Escola Politécnica (Poli) da USP. Este equipamento opera com um tubo de raios X de ânodo de ródio (Rh), configurado para 35 kV de voltagem e 800 μ A de corrente, sob condições de baixo vácuo (2 mbar). As imagens de μ -XRF foram adquiridas com resolução de 60 μ m e um tempo de aquisição de 10 ms por pixel. Os mapas composicionais permitiram analisar a textura e a distribuição das fases minerais, com destaque para o topázio, utilizando dois detectores do tipo SDD (silicon-drift detector) com aquisição por espectroscopia por dispersão de energia (EDS).

4.5 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas com o equipamento LEO Stereoscan 440, equipado com fonte de filamento de tungstênio (W) e um sistema de microanálise EDS INCA, da marca Oxford, no LCT-Poli-USP. As imagens foram adquiridas utilizando um detector de elétrons retroespalhados (QBSD) sob alta tensão (EHT) de 20 kV. O sistema incluiu um detector EDS de silício, com resolução de 129 eV para a linha Mn-K α , e um detector monocromático de catodoluminescência. Foram obtidas análises semi-quantitativas, além de imagens de elétrons retroespalhados (BSE) e de catodoluminescência dos cristais de topázio das amostras IPV-35A e IPV-15D, e de imagens de wolframita e cassiterita na amostra IPV-15D.

4.6 Composição de elementos maiores em mica por Microsonda Eletrônica

As composições de elementos maiores da mica da amostra IPV-15D foram determinadas utilizando uma microsonda eletrônica JEOL JXA-8530F, equipada com canhão eletrônico de emissão de campo (Field Emission - FE) e cinco espectrômetros de dispersão de comprimento de onda (WDS), além de um espectrômetro de dispersão de energia (EDS). As análises foram realizadas no Núcleo de Apoio à Pesquisa (NAP) Geoanalítica, do Instituto de Geociências (IGc) da Universidade de São Paulo (USP). A quantificação das intensidades de raios X foi convertida em concentrações e as correções de efeitos de matriz foram efetuadas por meio do software PRZ/Armstrong. A calibração foi realizada com padrões naturais e sintéticos das coleções do Instituto Smithsonian e da Geller™, garantindo precisão nos resultados. Os erros analíticos estimados foram de $\leq 2\%$ para elementos maiores e entre 5% e 10% para elementos menores. As análises quantitativas foram conduzidas sob condições de operação de 15 kV de voltagem de aceleração e 20 nA de corrente de feixe de elétrons, com um tamanho de feixe de 5 μ m.

A fórmula estrutural da mica foi calculada com base em 22 átomos de oxigênio por fórmula unitária. Os teores de Li₂O* foram estimados por regressão de F, conforme descrito por Tischendorf et al. (1997), embora os valores calculados apresentassem subestimação em comparação aos valores obtidos por LA-ICP-MS. Os teores de H₂O* foram calculados com base na estequiometria como 4 - (F, Cl). Todos os cálculos foram realizados utilizando

uma tabela desenvolvida pelo Prof. Andrew Tindle, atualmente indisponível online. Os resultados das análises estão apresentados na Tabela 2.

4.7 Análise de elementos traços por LA-ICP-MS

As análises de elementos traço foram realizadas por espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente e ablação a laser (LA-ICP-MS) no Laboratório de Química (ICP), parte do Núcleo de Apoio à Pesquisa Geoanalítica do Instituto de Geociências (IGc-USP). O equipamento utilizado foi o espectrômetro de massa iCapQ (Thermo Scientific), acoplado a um sistema de ablação a laser Nd com comprimento de onda de 213 nm (CETAC LSX-213 G2+). Foram analisados 62 elementos químicos em amostras de wolframita, cassiterita e mica do veio mineralizado IPV-15D, com o objetivo de investigar a origem e evolução dos processos hidrotermais associados; contudo, nem todos foram apresentados devido aos baixos limites de detecção

A calibração primária e o controle do *drift* foram realizados utilizando o padrão de vidro NIST-610, e os materiais de referência NIST-612, BHVO, BCR e BIR foram usados para verificar a qualidade dos dados. Para a padronização interna visando a quantificação em ppm, foram empregados os dados de EDS (média) e microsonda eletrônica, com WO_3 para wolframita, SnO_2 para cassiterita e Al_2O_3 para mica.

As condições operacionais incluíram uma potência de plasma de 1550 W, fluxo de nebulizador de 0,75 L/min, fluxo auxiliar de 0,8 L/min e fluxo de resfriamento de 14 L/min. Na câmara de ablação a laser, foi utilizado gás hélio para otimizar a ablação e o transporte de aerossóis. A taxa de repetição do laser foi ajustada para 15 Hz, com uma potência de 65% e fluência de 5,97 J/cm², e o tamanho do ponto de análise foi de 50 µm. As aquisições consistiram em 30 segundos de branco seguidos por 40 segundos de ablação, e o processamento dos dados foi realizado com o software Glitter (Van Achterbergh et al., 2001).

A Figura 6 ilustra o equipamento utilizado para essas análises.

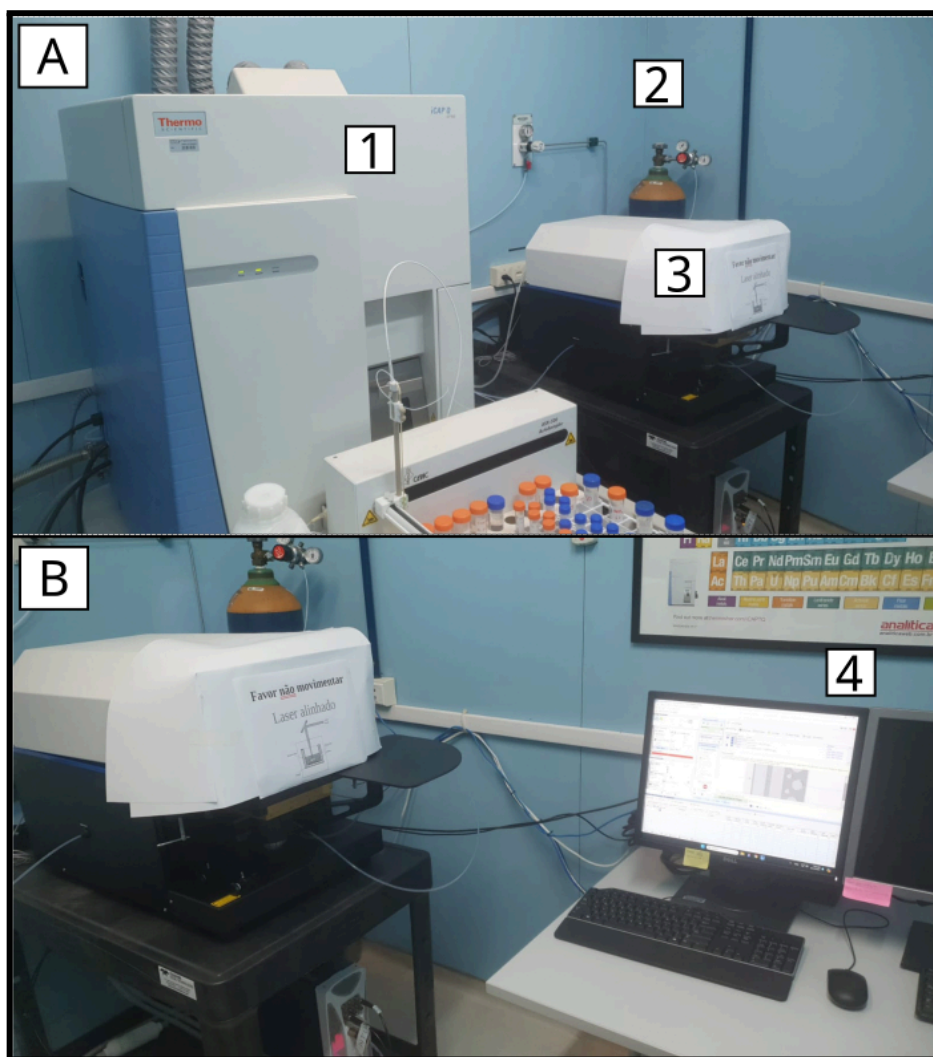


Figura 6. Equipamentos utilizados na análise de elementos traço por espectroscopia de massa com plasma indutivamente acoplado e ablação a laser (LA-ICP-MS). **(A)** espectrômetro de massa com analisador quadrupolo iCapQ (Thermo Scientific) (1); Cilindro de gás Argônio utilizado para alimentar o plasma (2); equipamento de Laser Ablation modelo CETAC LSX-213 G2+ (3); **(B)** Computador utilizado para programar e monitorar as análises (4).

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Mapeamento e microtermometria de inclusões fluidas

Para a análise das inclusões fluidas, foram selecionados dois cristais de topázio (TPZ-I e TPZ-II) a partir de fragmentos de seção bipolar da amostra IPV-15D. No cristal TPZ-I, foram mapeados três campos (Campo I, II e III) em áreas menos fraturadas (Fig. 7). Ao todo, foram analisadas 50 inclusões (PR-I-1 a PR-I-50) aquosas e bifásicas (L+V), contendo uma fase líquida (L) de $H_2O+NaCl$ e uma fase de vapor (V) de H_2O . Essas inclusões foram classificadas como primárias, com exceção da inclusão secundária (SE-I-22) e algumas pseudosecundárias (PS-I-26 a PS-I-31). As inclusões primárias variam amplamente em forma, tamanho e volume de gás, este último variando entre 5 a 30%. Além disso, mais 2 campos de inclusões secundárias (Campos VI e VII) foram mapeados,

totalizando 12 inclusões (SE-I-1 a SE-I-12), com características de distribuição, forma e tamanho mais padronizadas.

No cristal TPZ-II (Fig. 8), foram mapeados dois campos de inclusões primárias (Campos IV e V), localizadas em extremidades opostas do cristal. Ao todo, 26 inclusões aquosas e bifásicas (PR-II-1 a PR-II-26) foram analisadas nesses campos, sendo classificadas como primárias, exceto duas inclusões pseudosecundárias (PS-II-21 e PS-II-22). Foram também mapeados mais dois campos (Campos VIII e IX), onde 12 inclusões secundárias (SE-II-1 a SE-II-12) foram analisadas, com características semelhantes às secundárias em TPZ-I. A Tabela 1 apresenta as variações de dados microtermométricos para as inclusões primárias, secundárias e pseudosecundárias dos cristais TPZ-I e TPZ-II, enquanto o Anexo 1 apresenta todos os dados detalhados.

Tabela 1. Dados de microtermometria para as assembléias de inclusões fluidas aquosas em TPZ-I e TPZ-II da amostra IPV15D.

Hospedeiro	Ocorrência	Tipo	TfG (°C)	Th (°C)	Densidade total (g/cm ³)	Salinidade (wt.% NaCleq.)
TPZ - I	Primárias	Aquosas	-0,1 a -2,8	205 a 324	0,68 a 0,89	0,17 a 4,705
	Secundárias	Aquosas	-0,3 a -3,4	142 a 210	0,82 a 0,933	0,53 a 5,56
	pseudo secundárias	Aquosas	-1,0 a -2,3	213 a 245	0,817 a 0,874	1,764 a 3,910
TPZ - II	Primárias	Aquosas	-4,3 a -11,2	204 a 289	0,84 a 0,97	7,73 a 15,17
	Secundárias	Aquosas	-3,7 a -7,5	184 a 221	0,91 a 0,95	6,01 a 11,01
	pseudo secundárias	Aquosas	-6,4 a -10,6	213 a 222	0,921 a 0,964	9,727 a 14,560

Legenda Tabela 1: temperatura de fusão do gelo (Tfg); temperatura de homogeneização (Th) e densidade total (densidade das fases líquida + gasosa).

Ambos os cristais apresentam um grande volume de fraturas e inclusões primárias e secundárias com características semelhantes, sendo todas aquosas e bifásicas. A diferença das inclusões ocorre apenas por suas características petrográficas como, como padrão de distribuição, forma, tamanho e volume da fase gasosa. Essa similaridade dificulta a definição de assembleias de inclusões fluidas (FIA's), conforme descrito por Goldstein e Reynolds (1994), uma vez que as inclusões frequentemente se sobrepõem e possuem características petrográficas e físico-químicas muito semelhantes, tornando muito difícil correlacioná-las com o contexto de aprisionamento do fluido. Dada a semelhança petrográfica e as frequentes fraturas, as inclusões foram agrupadas como primárias, secundárias e pseudosecundárias em TPZ-I e em TPZ-II.

O grande volume de fraturas e a presença de inclusões com características petrográficas semelhantes, mas aprisionadas em momentos distintos, sugerem que

algumas inclusões originalmente primárias podem ter sofrido processos de reequilíbrio. Em alguns casos, as trilhas de inclusões secundárias parecem perfeitamente cicatrizadas, e as inclusões nestas trilhas que apresentam tamanho e distribuição diferentes podem facilmente ser confundidas com inclusões primárias e pseudosecundárias, conforme discutido em Yang et al. (2019).

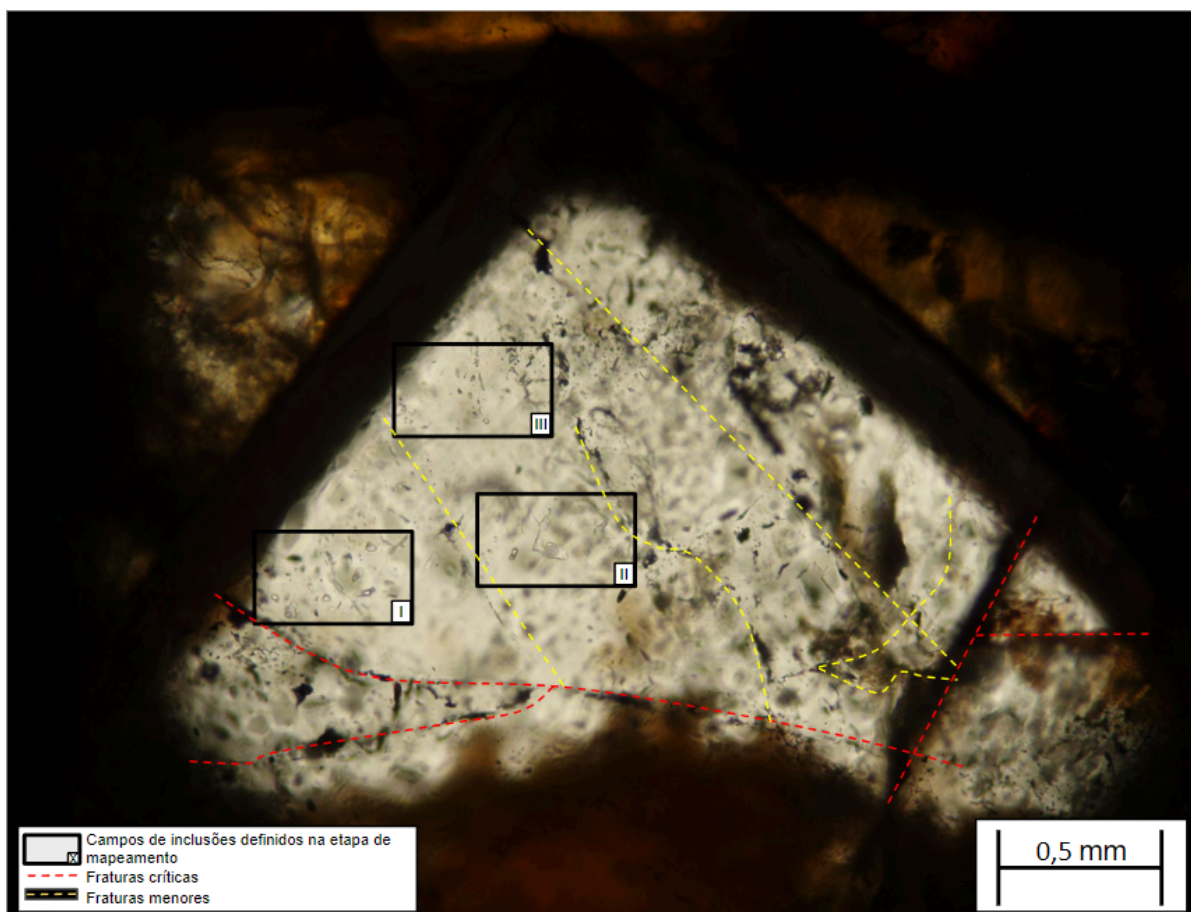


Figura 7. Fotomicrografia do cristal de topázio TPZ-I em seção bipolar da amostra IPV15D, com os campos (I, II e III) contendo as inclusões fluidas analisadas por microtermometria e espectroscopia Raman. O pontilhado vermelho destaca as fraturas mais críticas do cristal, já o pontilhado amarelo destaca os conjuntos de fraturas irregulares presentes ao longo de toda a estrutura do cristal. Fotomicrografia obtida utilizando microscópio petrográfico sob luz transmitida com objetiva de aumento de 10x.

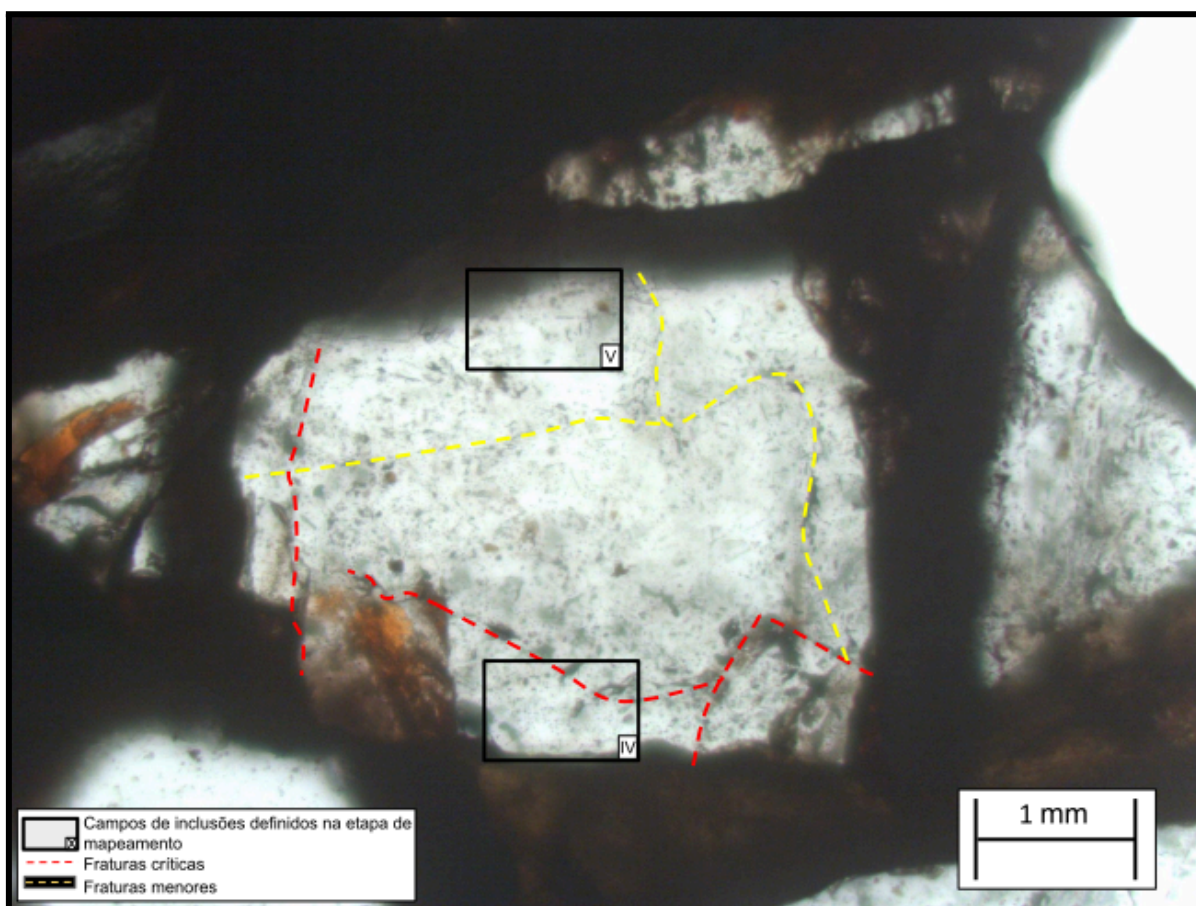


Figura 8. Fotomicrografia do cristal de topázio TPZ-II em seção bipolar da amostra IPV15D, com os campos (I, II) contendo as inclusões fluidas analisadas por microtermometria. O pontilhado vermelho destaca as fraturas mais críticas do cristal, já o pontilhado amarelo destaca os conjuntos de fraturas irregulares presentes ao longo de toda a estrutura do cristal. Fotomicrografia obtida utilizando microscópio petrográfico sob luz transmitida com objetiva de aumento de 5x.

5.1.1 Caracterização das inclusões

As inclusões primárias observadas em TPZ-I (Fig. 9) e TPZ-II (Fig. 10) apresentam um padrão de distribuição irregular, com agrupamentos ao longo da superfície do cristal, especialmente próximos às bordas, enquanto as trilhas de inclusões secundárias e pseudosecundárias predominam nas regiões mais centrais. As formas das inclusões primárias variam de isométricas a irregulares, de arredondadas a sub-angulosas, com tamanhos de 5µm a 40µm. As inclusões isométricas ocorrem apenas nas bordas do cristal TPZ-I, comumente exibindo maior birrefringência, o que lhes atribui uma aparência mais espessa. Inclusões primárias com formato de cristal negativo são raras e ocorrem esporadicamente em agrupamentos de ambos os cristais.

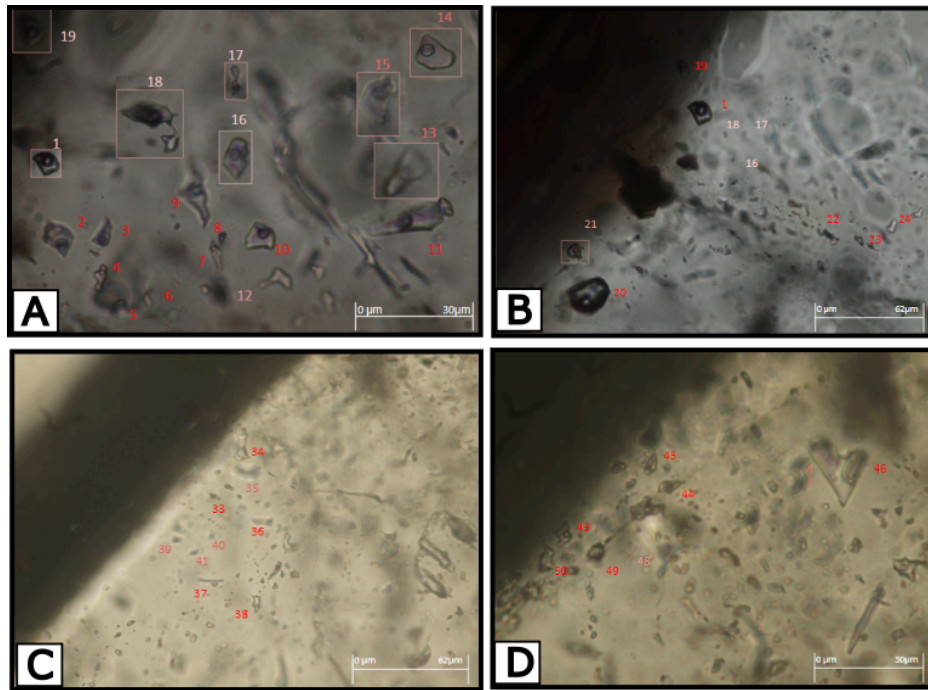


Figura 9. Detalhe das inclusões fluidas primárias analisadas (números em vermelho) nos campos mapeados I, II e III (Fig. 7) no cristal de topázio TPZ-I da amostra IPV15D: **(A)** inclusões PR-I-1 a PR-I-19 - campo I (objetiva de aumento de 100x); **(B)** inclusões primárias PR-I-19 a PR-I-24 - campo I (lente de aumento de 50x); **(C)** inclusões primárias PR-I-33 a PR-I-42 - campo III (objetiva de aumento de 50x); **(E)** inclusões primárias PR-I-43 a PR-I-50 - campo III (objetiva de aumento de 100x). Devido aos diferentes focos de posicionamento, as inclusões destacadas foram inseridas digitalmente na sua posição original de acordo com a escala. As imagens foram obtidas com microscópio petrográfico sob luz transmitida.

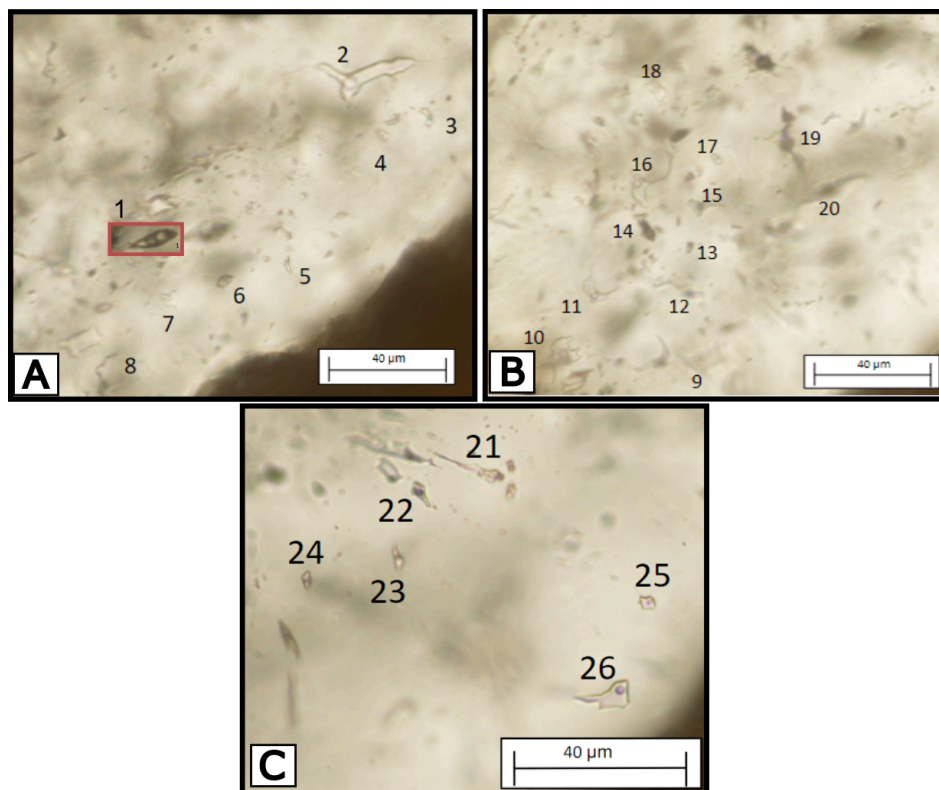


Figura 10. Detalhe das inclusões fluidas primárias analisadas (números em vermelho) nos campos mapeados IV e V (Fig. 8) no cristal de topázio TPZ-II da amostra IPV15D: **(A)** inclusões PR-II-1 a PR-II-8 - campo IV (objetiva

de aumento de 100x); **(B)** inclusões PR-II-9 a PR-II-20 - campo IV (lente de aumento de 100x); **(C)** inclusões PS-II-21 a PS-II-22 e PR-II-23 a PR-II-26 - campo V (objetiva de aumento de 100x). Devido aos diferentes focos de posicionamento, as inclusões destacadas foram inseridas digitalmente na sua posição original de acordo com a escala. As imagens foram obtidas com microscópio petrográfico sob luz transmitida.

As inclusões secundárias em TPZ-I (Fig. 11) e TPZ-II (Fig. 12) são majoritariamente alongadas, orientadas, com tamanhos menores que 5 μ m, distribuídas em trilhas contínuas. A maioria exibe formas tabulares angulosas, embora algumas apresentem formas irregulares e sub-arredondadas, com tamanhos de até 25 μ m. Essas inclusões secundárias estão frequentemente associadas a fraturas visíveis ou fraturas já cicatrizadas que preservam as trilhas de inclusões aprisionadas. Para garantir a natureza das inclusões analisadas, foram mapeadas aquelas associadas às principais fraturas na superfície de ambos cristais.

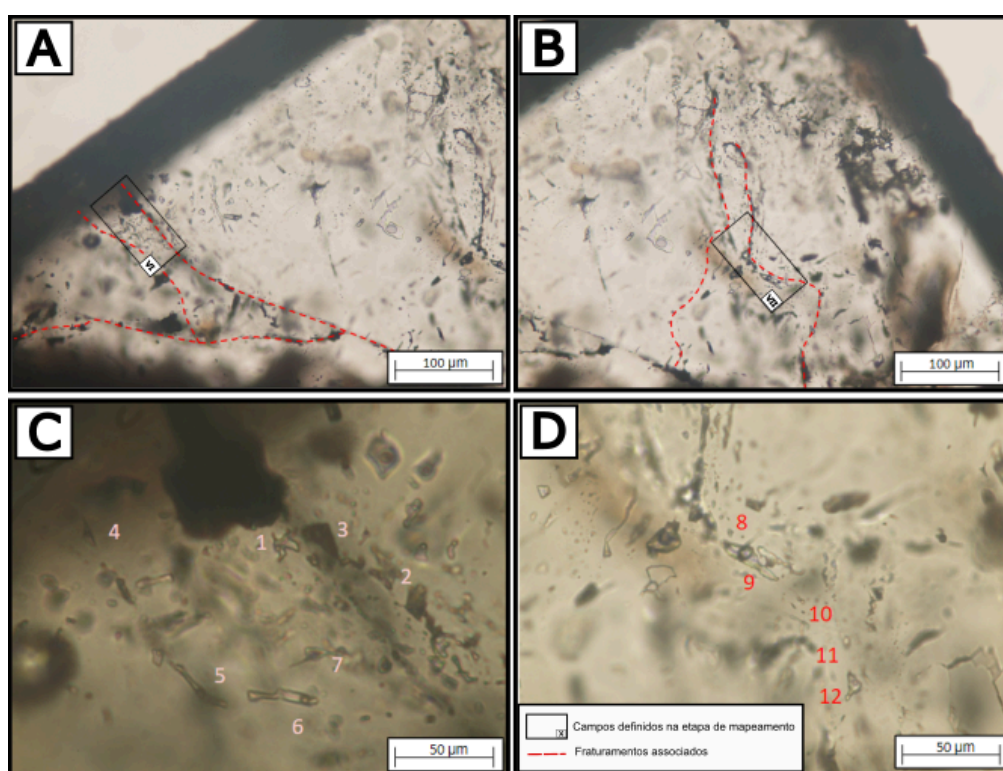


Figura 11. Detalhe das inclusões fluidas secundárias analisadas (números em vermelho) ao longo das principais fraturas no cristal de topázio TPZ-I da amostra IPV15D: **(A)** Detalhe da fratura e localização do campo VI (objetiva de aumento de 20x); **(B)** Detalhe da fratura e localização do campo VII (objetiva de aumento de 20x) **(C)** inclusões SE-I-1 a SE-I-7 - campo VI (lente de aumento de 50x); **(D)** inclusões SE-I-8 a SE-I-12 - campo VII (objetiva de aumento de 50x). As imagens foram obtidas com microscópio petrográfico sob luz transmitida.

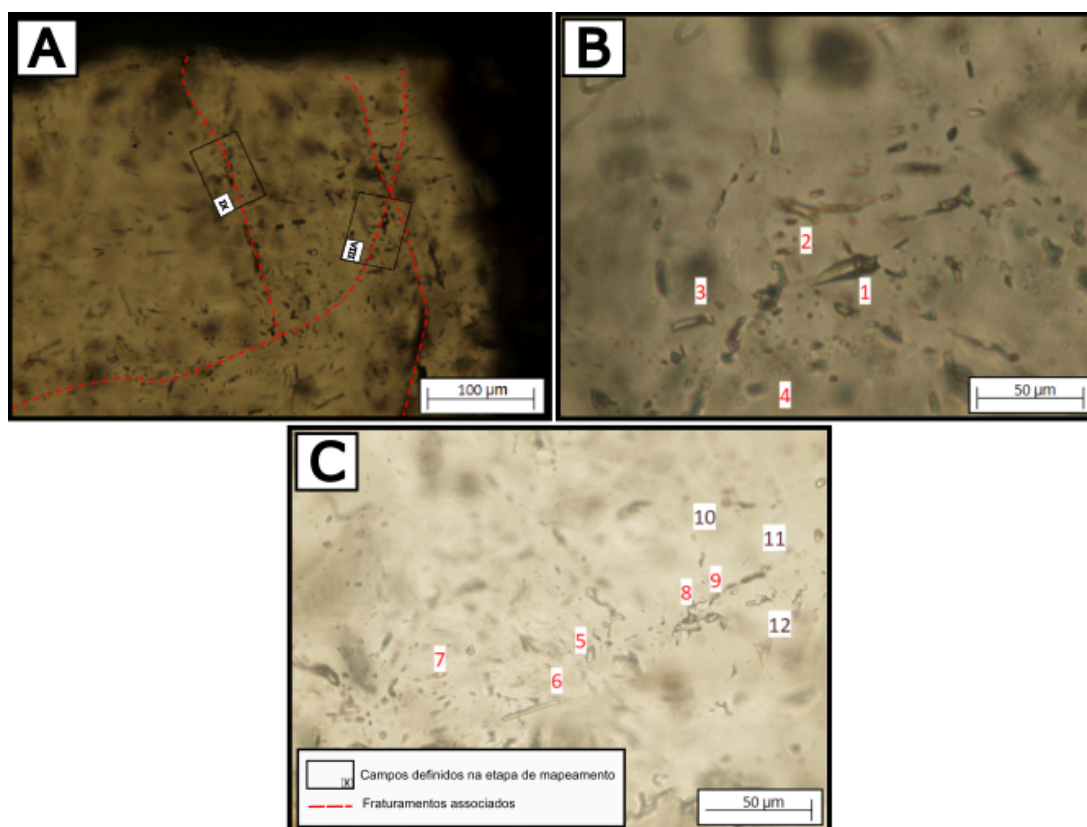


Figura 12. Detalhe das inclusões fluidas secundárias analisadas (números em vermelho) ao longo das principais fraturas no cristal de topázio TPZ-II da amostra IPV15D: **(A)** Detalhe da fratura e localização dos campos VIII e IX (objetiva de aumento de 20x); **(B)** inclusões SE-II-1 a SE-II-4 - campo VIII (lente de aumento de 50x); **(C)** inclusões SE-II-5 a SE-II-12 - campo IX (lente de aumento de 50x).

As inclusões pseudosecundárias ocorrem tanto em TPZ-I (Fig. 13 A) quanto em TPZ-II (Fig. 13 B) e apresentam padrões de distribuição e tamanho semelhantes às inclusões secundárias. Porém, ocorrem em trilhas descontínuas próximas aos agrupamentos de inclusões primárias e possuem formas menos alongadas e mais arredondadas.

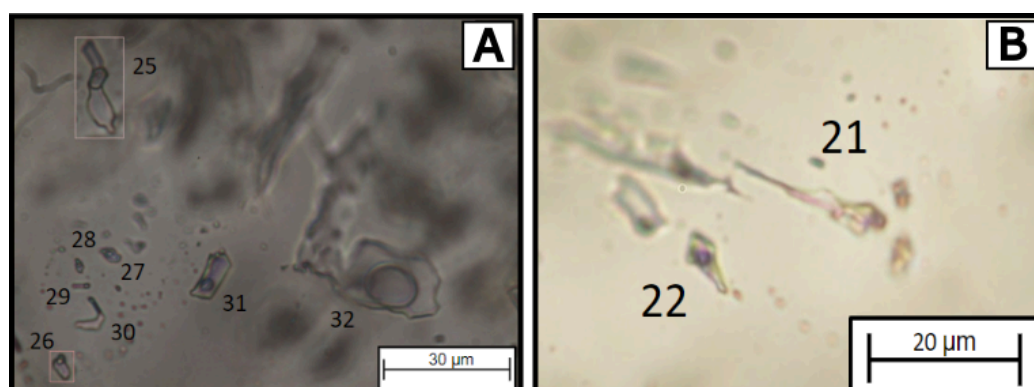


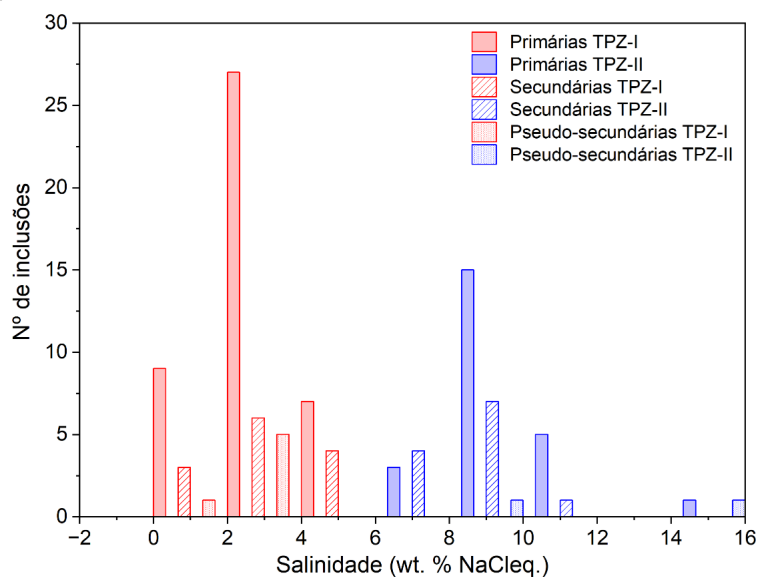
Figura 13. Detalhe das inclusões fluidas pseudosecundárias analisadas na amostra IPV15D: **(A)** Detalhe das inclusões PS-I-25 a PS-I-32 - campo II (TPZ-I) (objetiva de aumento de 100x); **(B)** Detalhe das inclusões PS-II-21 e PS-II-22 - campo V (TPZII) (objetiva de aumento de 100x). As imagens foram obtidas com microscópio petrográfico sob luz transmitida.

5.1.2 Análise estatística de dados de salinidade e Temperatura de homogeneização das inclusões fluidas

O histograma de salinidade (Figura 14A) das inclusões fluidas evidencia uma ampla variação nos dados, com valores distribuídos de 0 a 16 wt.% NaC_{leq}. Observam-se dois padrões principais: as inclusões primárias de TPZ-I concentram-se em salinidades baixas (0 a 4 wt.%), enquanto as primárias de TPZ-II predominam em uma faixa intermediária (8 a 12 wt.%). Apesar disso, há uma sobreposição nas faixas de salinidade de diferentes ocorrências, refletindo a heterogeneidade do sistema. A média de salinidade calculada foi de 3,91 wt.% NaC_{leq}., o que reflete a predominância de valores baixos, especialmente para TPZ-I. O desvio padrão (3,14 wt.% NaC_{leq}.) indica uma dispersão significativa dos dados em relação à média. Já o coeficiente de variação (80,3%) sugere uma alta variabilidade relativa a média de salinidade, consistente com a amplitude observada no histograma.

O histograma de temperaturas de homogeneização (Th) (Figura 14B) apresenta uma distribuição concentrada, com valores variando principalmente entre 200 e 250 °C, o que é consistente com a média calculada de 223,75 °C. Esse valor representa o centro da faixa onde ocorre a maior concentração de dados, especialmente para as inclusões primárias de TPZ-I e TPZ-II. O desvio padrão de 27,24 °C indica que os valores estão moderadamente dispersos em torno da média, refletindo uma variação limitada nas condições térmicas do sistema. O coeficiente de variação de 12,17% aponta para uma baixa variabilidade relativa, sugerindo que, apesar de algumas oscilações, as temperaturas registradas pelas inclusões fluidas foram relativamente homogêneas.

A Histograma de Salinidade (wt.% NaCleq.) das Inclusões Fluidas



B Histograma de Th (°C) das Inclusões Fluidas

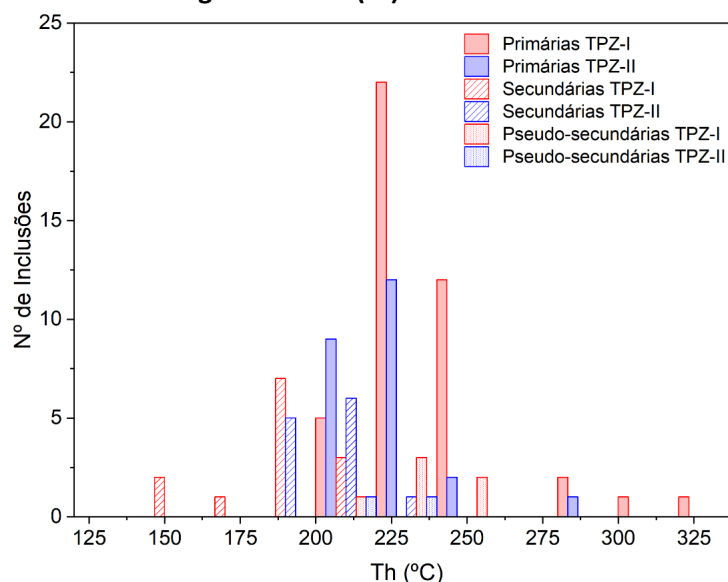


Figura 14. Histogramas dos parâmetros obtidos por microtermometria na amostra IPV15D para inclusões : **(A)** histograma dos valores de salinidade **(B)** Histograma dos valores de temperatura de homogeneização (Th)

O diagrama de Th versus salinidade das inclusões fluidas, apresentado na Figura 15, reúne os dados obtidos para todas as inclusões analisadas nos dois cristais de topázio do veio mineralizado. Três tendências principais foram observadas (T1, T2 e T3):

- **T1:** a maioria dos dados de inclusões primárias e pseudo-secundárias distribu-se em uma ampla faixa de salinidade (0 a 15 wt.%NaCleq), mas em um intervalo restrito de Th (200 a 255 °C).
- **T2:** comportamento semelhante a T1, porém apenas entre 5 dados obtidos, com salinidade variando entre 1 e 10 wt.%NaCleq e a Th entre 260 e 325 °C.

- **T3:** demonstra a tendência linear de variação das inclusões secundárias em ambas as amostras, com salinidade variando entre 0,5 e 12 %NaCleq, e T_h entre 142 e 222 °C.

Essas tendências, juntamente com a caracterização petrográfica das inclusões, fornecerão os subsídios para interpretar os possíveis processos atuantes na evolução da fase fluida durante a cristalização do topázio.

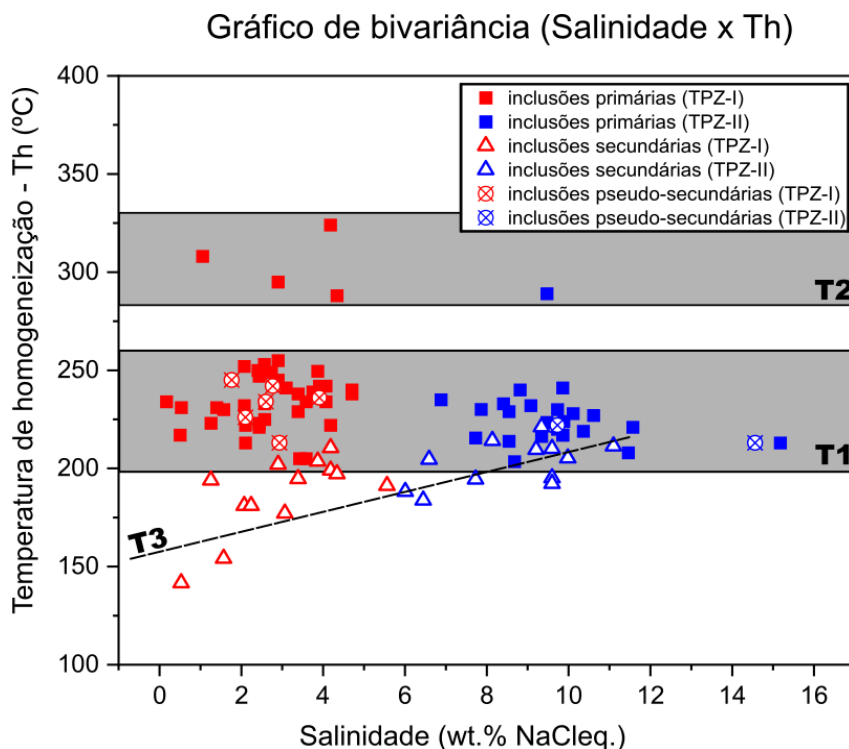


Figura 15. Diagrama de salinidade versus temperatura de homogeneização (T_h) para as 100 inclusões analisadas. As inclusões de TPZ-I estão em vermelho no diagrama e as inclusões de TPZ-II estão em azul, além disso são destacadas as principais tendências entre a distribuição das inclusões (T1, T2 e T3).

5.1.3 Perfis de variação de salinidade e T_h

Para melhor compreender o padrão de distribuição das inclusões e a evolução da fase fluida durante a cristalização do topázio no veio, foram traçados perfis nas zonas entre a borda e o núcleo dos cristais. As trajetórias desses perfis foram aproximadamente perpendiculares às bordas dos cristais, nos campos onde predominam inclusões primárias e pseudosecundárias de ambos. No cristal TPZ-I, os perfis foram traçados no sentido borda-núcleo, enquanto no cristal TPZ-II, no sentido núcleo-borda. Essa abordagem permitiu observar a variação dos parâmetros obtidos por microtermometria e correlacionar essa variação com a distribuição das inclusões ao longo de possíveis zonas de crescimento do cristal.

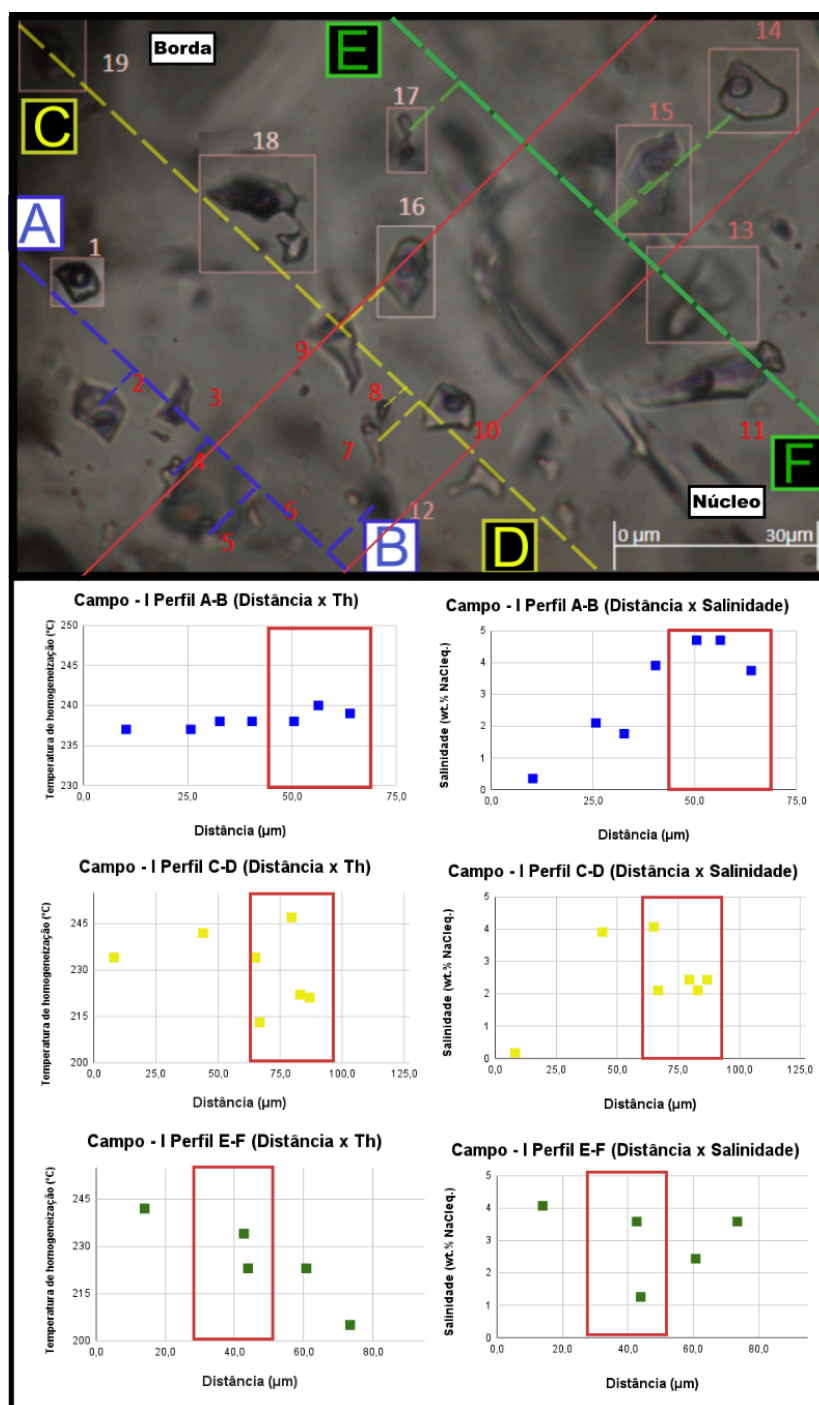


Figura 16. Detalhe das inclusões do campo I, os perfis elaborados neste campo (A-B), (C-D) e (E-F) e os diagramas de variação de Th (à esquerda da imagem) e salinidade (à direita da imagem) ao longo da distância relativa ao início do perfil.

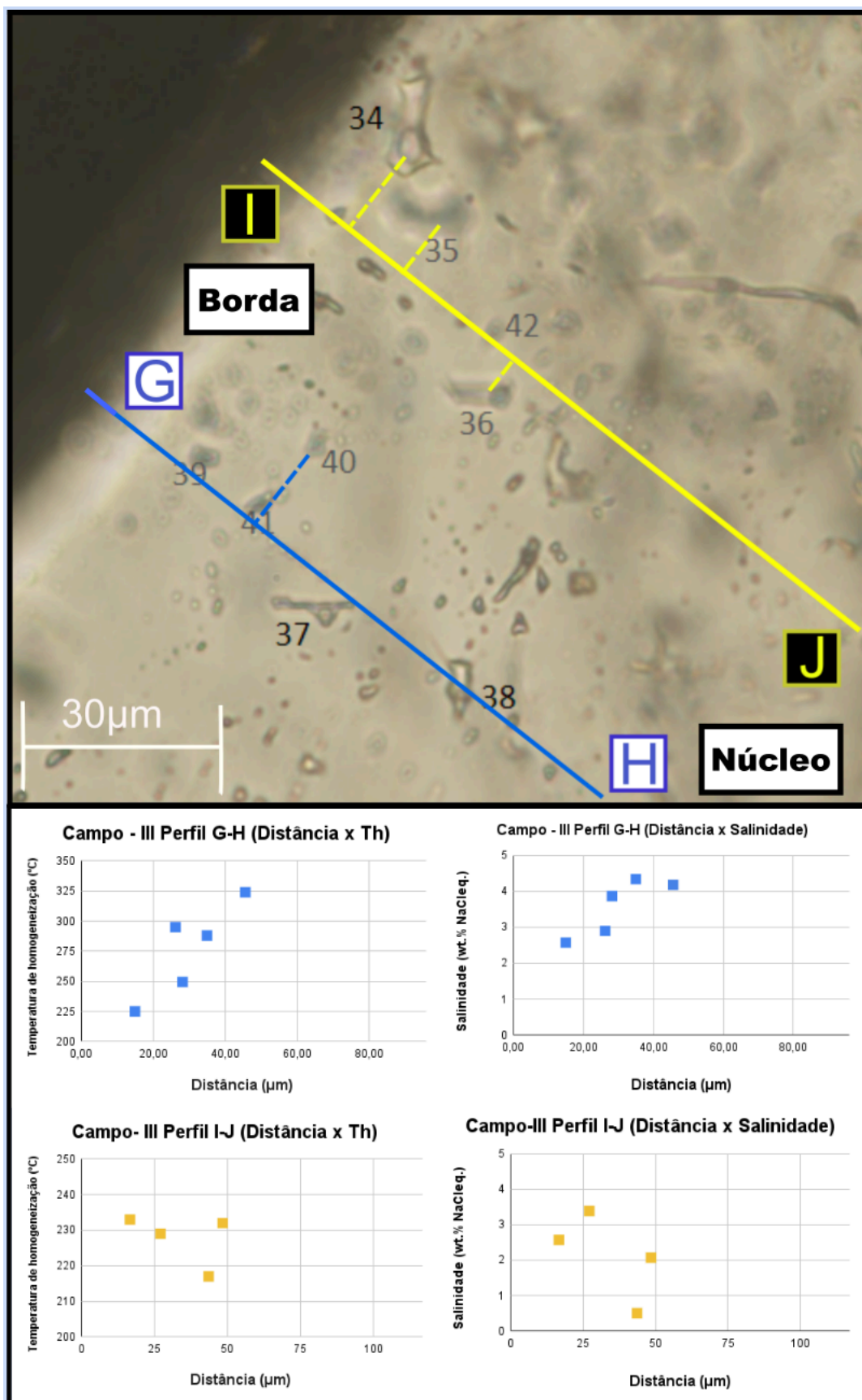


Figura 17. Detalhe das inclusões do campo III, os perfis elaborados neste campo (G-H) e (I-J) e os diagramas de variação de Th (à esquerda da imagem) e salinidade (à direita da imagem) ao longo da distância relativa ao início do perfil.

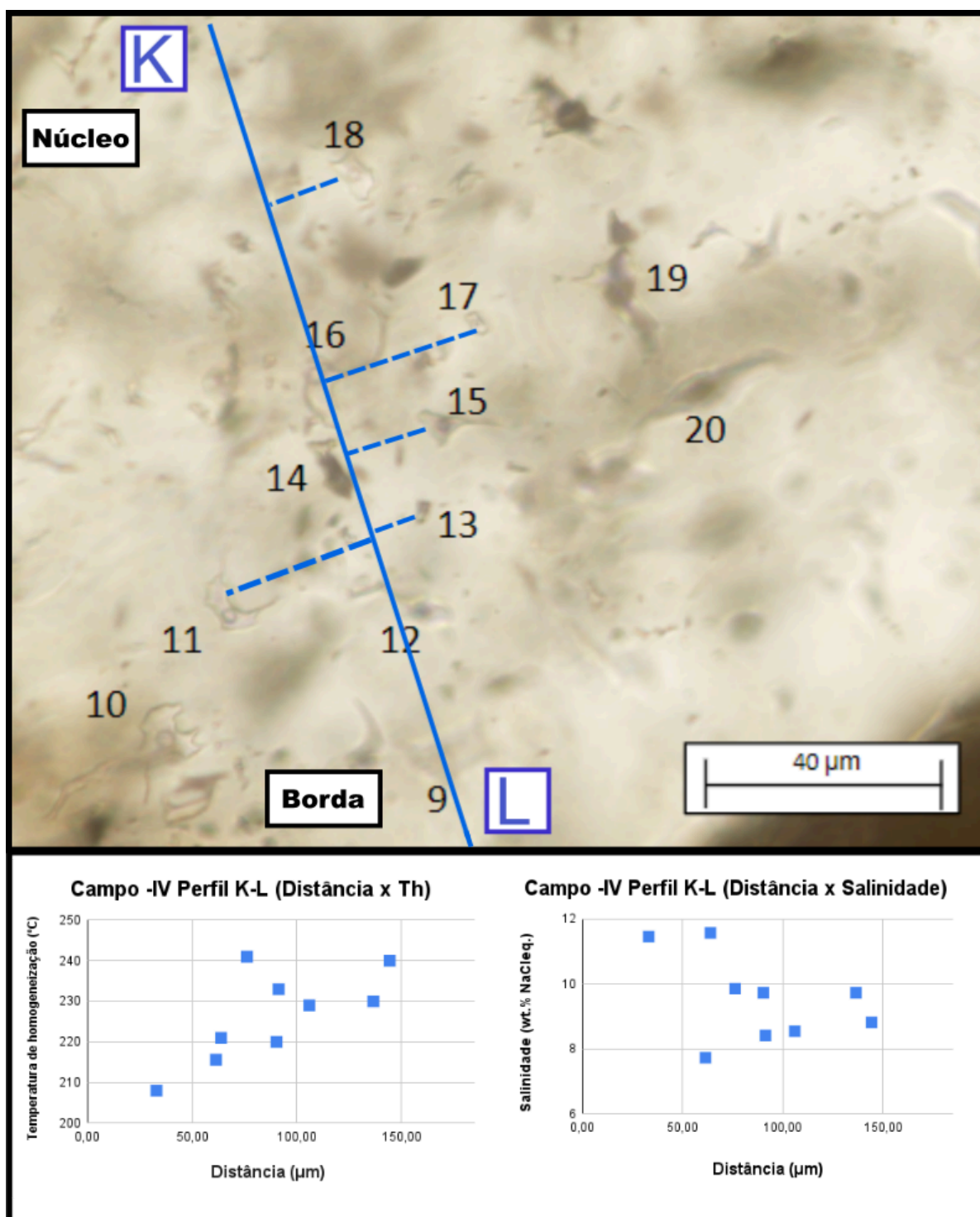


Figura 18. Detalhe das inclusões do campo IV, os perfis elaborados neste campo (K-L) e os diagramas de variação de Th (à esquerda da imagem) e salinidade (à direita da imagem) ao longo da distância relativa ao início do perfil.

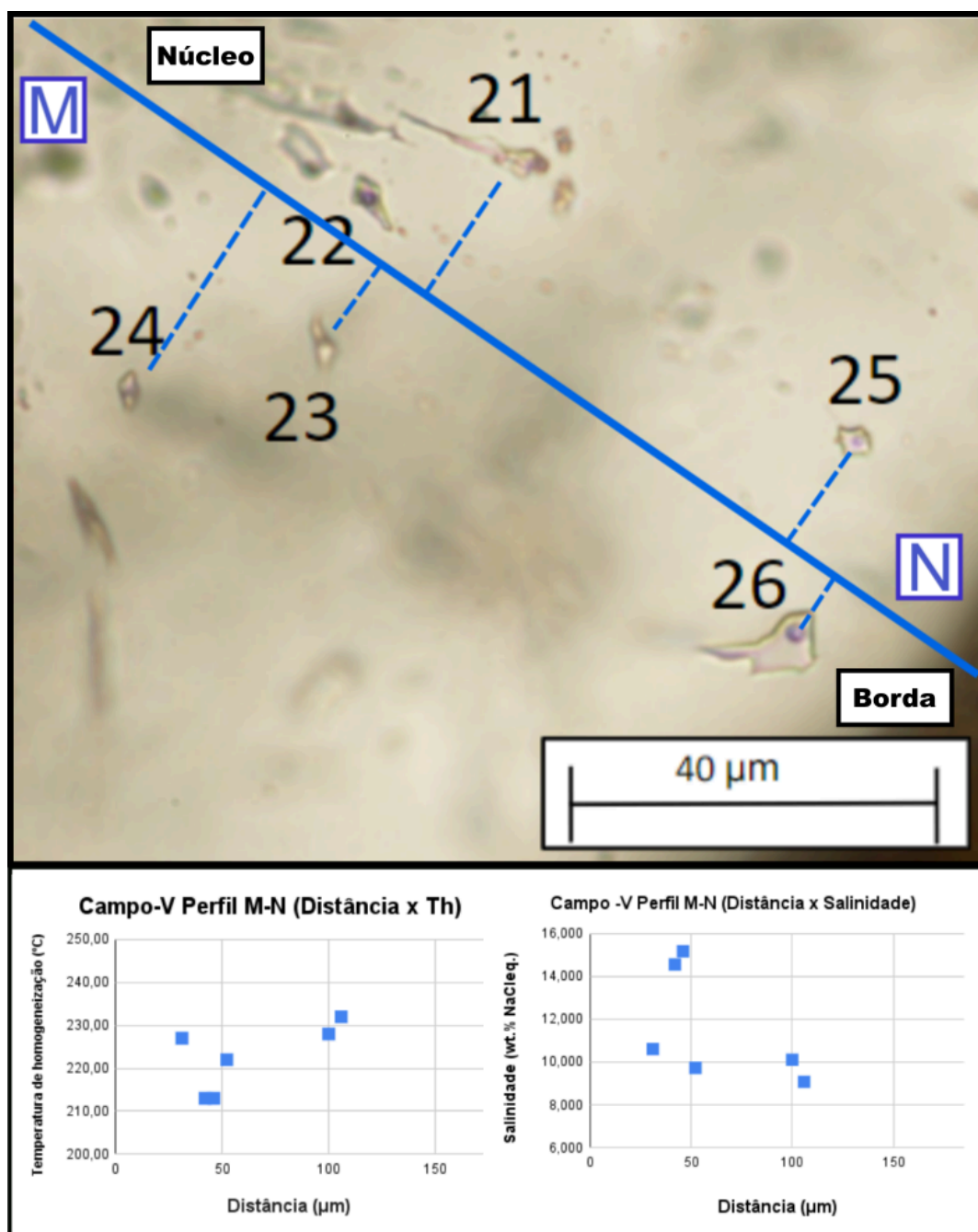


Figura 19. Detalhe das inclusões do campo V, os perfis elaborados neste campo (M-N) e os diagramas de variação de Th (à esquerda da imagem) e salinidade (à direita da imagem) ao longo da distância relativa ao início do perfil.

Um novo perfil em TPZ-I (Fig. 20) foi traçado ligando o campo I (borda) ao campo II (Núcleo) para compreender melhor as inflexões observadas nos perfis em menor escala e a trajetória completa da evolução do fluido ao longo da cristalização deste mineral, proporcionando uma representação mais ampla entre o núcleo e a borda do cristal.

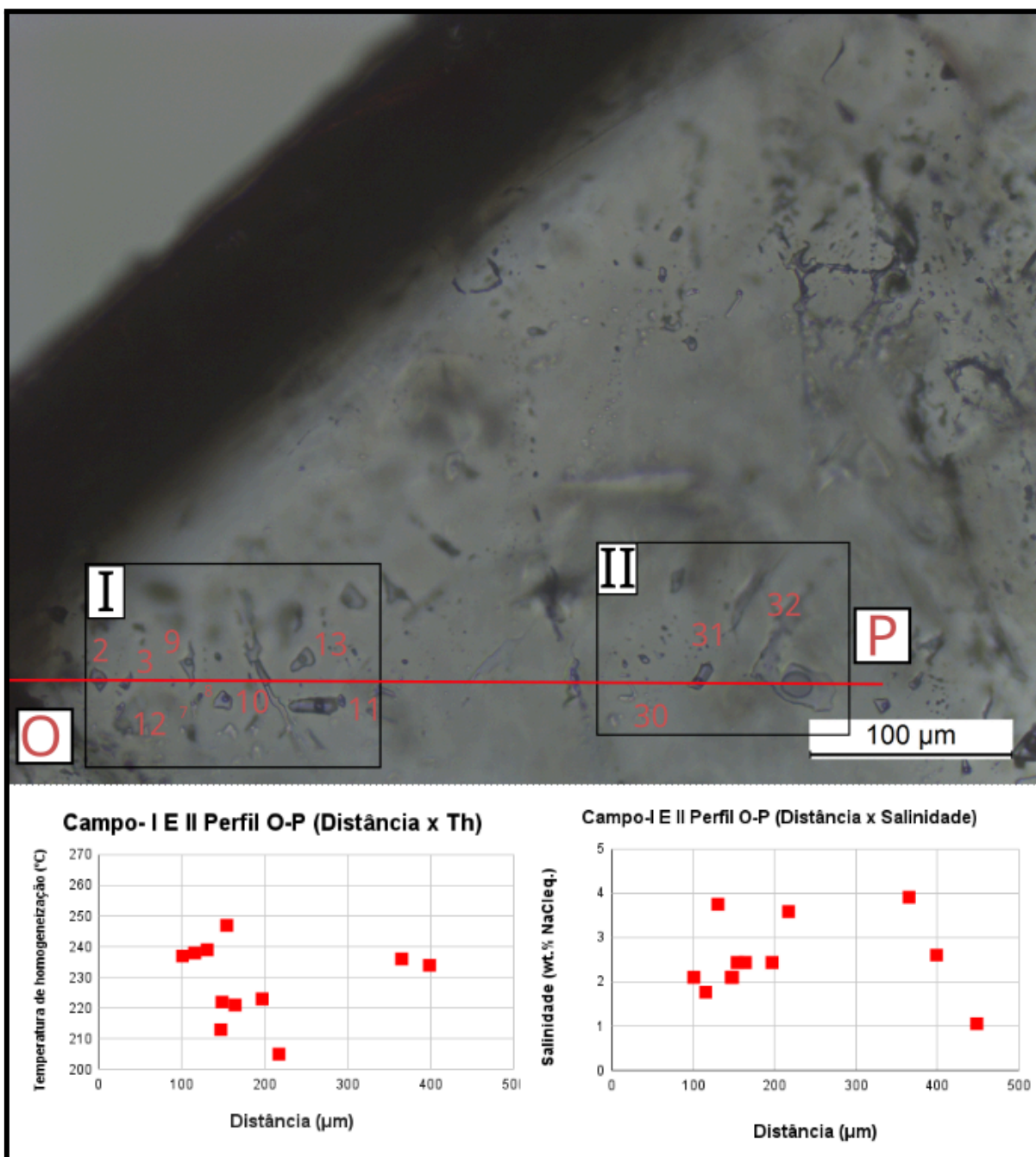


Figura 20. Detalhe das inclusões dos campos I e II, o perfil elaborado entre estes campos (O-P) e os diagramas de variação de Th (à esquerda da imagem) e salinidade (à direita da imagem) ao longo da distância relativa ao início do perfil.

Os dados das inclusões analisadas ao longo dos perfis (O-P, K-L e M-N) estão apresentados na Figura 21 em um novo diagrama de Th x salinidade, estes perfis foram selecionados pois representam trajetórias mais regulares entre o centro e a borda dos cristais e possuem um número maior de inclusões ao longo dessa trajetória, atribuindo continuidade à análise da variação dos dados. Em TPZ-I as inclusões apresentam uma variação de Th entre 200 e 250 °C e salinidade variando entre 2 e 4 wt.%NaCleq., mesmo que os valores apresentem inflexões pontuais, de forma geral é possível observar uma trajetória núcleo-borda de aumento progressivo de Th com diminuição na salinidade,

enquanto que as inclusões dos perfis traçados em TPZ-II apresentam uma variação de T_h entre 205 e 245 °C e de salinidade entre 10 e 16 wt.% NaCleq. em uma trajetória núcleo-borda onde também ocorrem diminuição da salinidade e aumento de T_h , porém a salinidade varia em um intervalo mais amplo. Algumas inclusões analisadas em ambos cristais apresentam valores de T_h que não correspondem ao padrão de variação observado ao longo dos perfis e foram desconsideradas na descrição destas trajetórias pois estes valores podem estar refletindo processos de reequilíbrio.

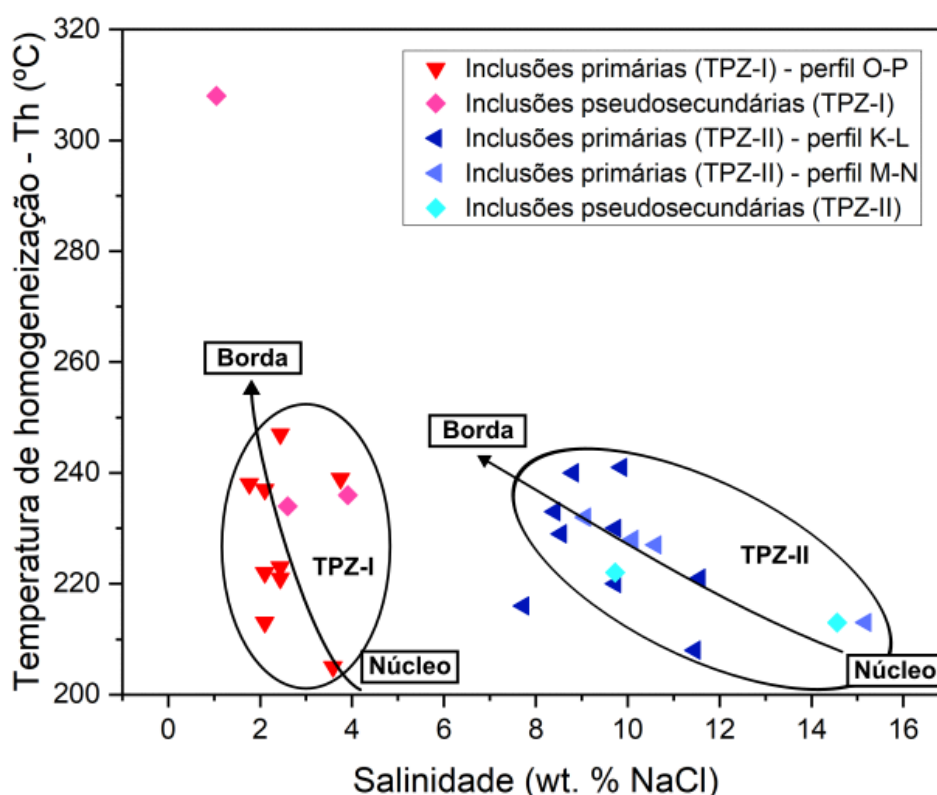


Figura 21. Diagrama de salinidade versus temperatura de homogeneização (T_h) para as 27 inclusões analisadas ao longo dos perfis traçados em TPZ-I (O-P) e em TPZ-II (M-N), destacando as trajetórias de evolução da fase fluida no sentido núcleo-borda observadas para cada cristal.

5.2 Espectroscopia Raman

As análises de espectrometria Raman foram realizadas nas inclusões localizadas no campo I em TPZ-I, no fragmento de seção bipolida da amostra IPV-15D (Fig. 7 e Fig. 9), tendo como alvo principal as inclusões com maior volume e espessura aparentes e menor densidade em relação às outras inclusões do mesmo fragmento, por essa ser uma característica indicativa de maior conteúdo de gás (Roedder, 1984). Também foi realizada a análise em uma inclusão em cristal de topázio da lâmina petrográfica da mesma amostra (Fig. 22-A). Nas inclusões do fragmento não foram observados picos equivalentes a modos

vibracionais de qualquer espécie gasosa além de vapor de H_2O . Já na inclusão no topázio da lâmina petrográfica, além dos picos correspondentes ao mineral hospedeiro (Fig. 23-P1) e dos picos de H_2O , entre 3000 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} (Sun, 2009; Fig. 23-P2), foram também observados o fenômeno de dupla de fermi, com picos em 1280 cm^{-1} e 1383 cm^{-1} (Fig.23-P3), atribuídos, respectivamente, aos modos de vibrações simétricos (ν_1) e assimétricos (ν_3) da molécula de CO_2 (Frezzotti et al., 2012). Assim, constatando a presença de inclusões aquo-carbônicas no topázio do veio mineralizado.

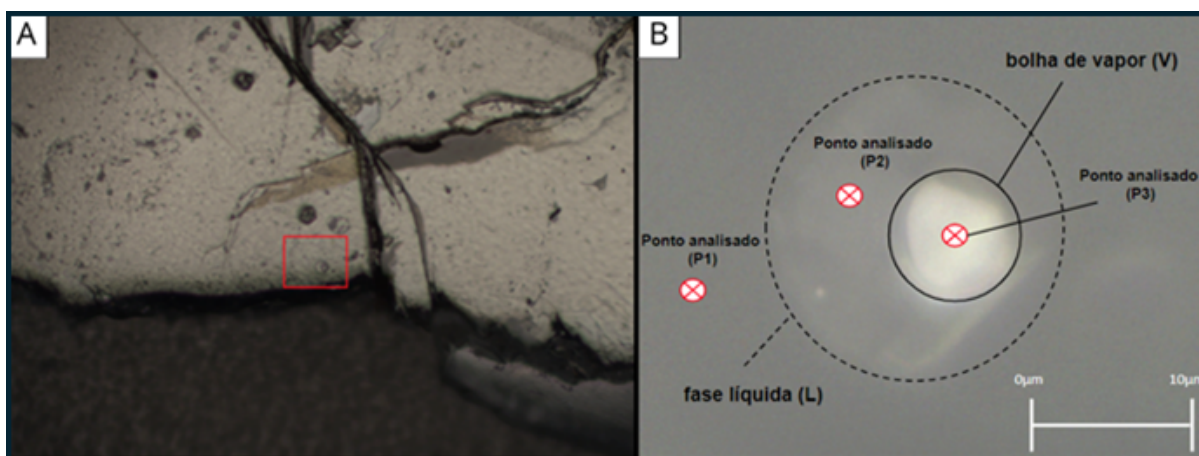


Figura 22. (A) Localização da inclusão no cristal de topázio da lâmina petrográfica (IPV15D) analisado por espectrometria Raman; (B) Imagem de detalhe em luz polarizada da inclusão, distinguindo as fases líquida e gasosa e indicando os alvos da análise (P1, P2 e P3).

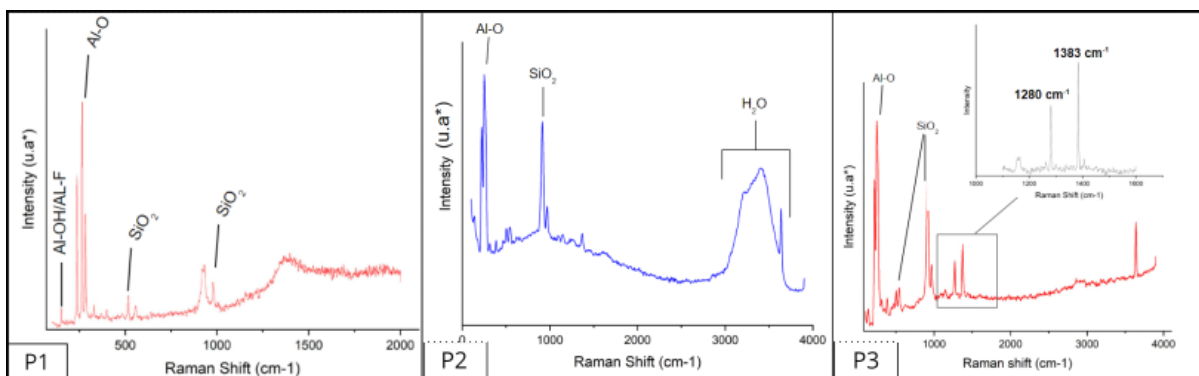


Figura 23. Análise Raman das inclusões fluidas da amostra IPV15D. (P1) Espectro obtido por meio da análise realizada no local indicado (cristal de topázio hospedeiro da inclusão) destacando os principais picos relacionados às ligações químicas de sua estrutura - 270 cm^{-1} e 320 cm^{-1} associados às vibrações Al-O e de deformação dos tetraedros de SiO_4 ; 490 cm^{-1} e 525 cm^{-1} relacionados a deformações e vibrações assimétricas do tetraedro de SiO_4 e 800 cm^{-1} atribuídos às vibrações de estiramento simétricas de SiO_4 . (Skvortsova et al., 2013). (P2) Espectro obtido por meio da análise realizada no local indicado (fase líquida da inclusão), destacando os principais picos obtidos em (A) e os novos picos obtidos entre 3000 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} característicos de modos vibracionais de ligações O-H em moléculas de água (Sun, Q., 2009). (P3) Espectro obtido por meio da análise realizada no local indicado (fase gasosa da inclusão), subtraindo o espectro da fase fluida e destacando os picos característicos observados em (A) e os novos picos obtidos característicos da dupla de fermi em 1280 cm^{-1} e 1383 cm^{-1} atribuídos respectivamente aos modos de vibrações simétricos (ν_1) e assimétricos (ν_3) da molécula de CO_2 (Frezzotti et al., 2012), caracterizando a presença de CO_2 na fase gasosa da inclusão. *u.a (unidade arbitrária).

5.2 Química e Textura Mineral

5.2.1 Topázio

Os dados EDS obtidos para o topázio nas amostras do veio (IPV-15D) e do granito (IPV-35A) mostraram resultados consistentes para os principais componentes: flúor (F), dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3), com pouca variação entre esses componentes (Anexo 2). Nas imagens BSE, não foi identificado zoneamento interno nos grãos de topázio. No entanto, as imagens de catodoluminescência revelaram um claro zoneamento oscilatório em todos os grãos de topázio do veio (Fig. 24 A a D), além de um zoneamento setorial menos nítido. Nos grãos de topázio do granito, o zoneamento oscilatório é visível, embora seja mascarado por um zoneamento mais irregular (Fig. 25 A e B).

Os grãos de topázio do veio são euédricos a subédricos, bastante fraturados e livres de inclusões, enquanto os grãos de topázio no granito são anédricos e também livres de inclusões. O zoneamento oscilatório, comum em topázio de origem magmática e hidrotermal, pode indicar variações nas condições de cristalização, como flutuações na composição química do fluido ou mudanças na temperatura e pressão durante o crescimento dos cristais (Agangi et al., 2016).

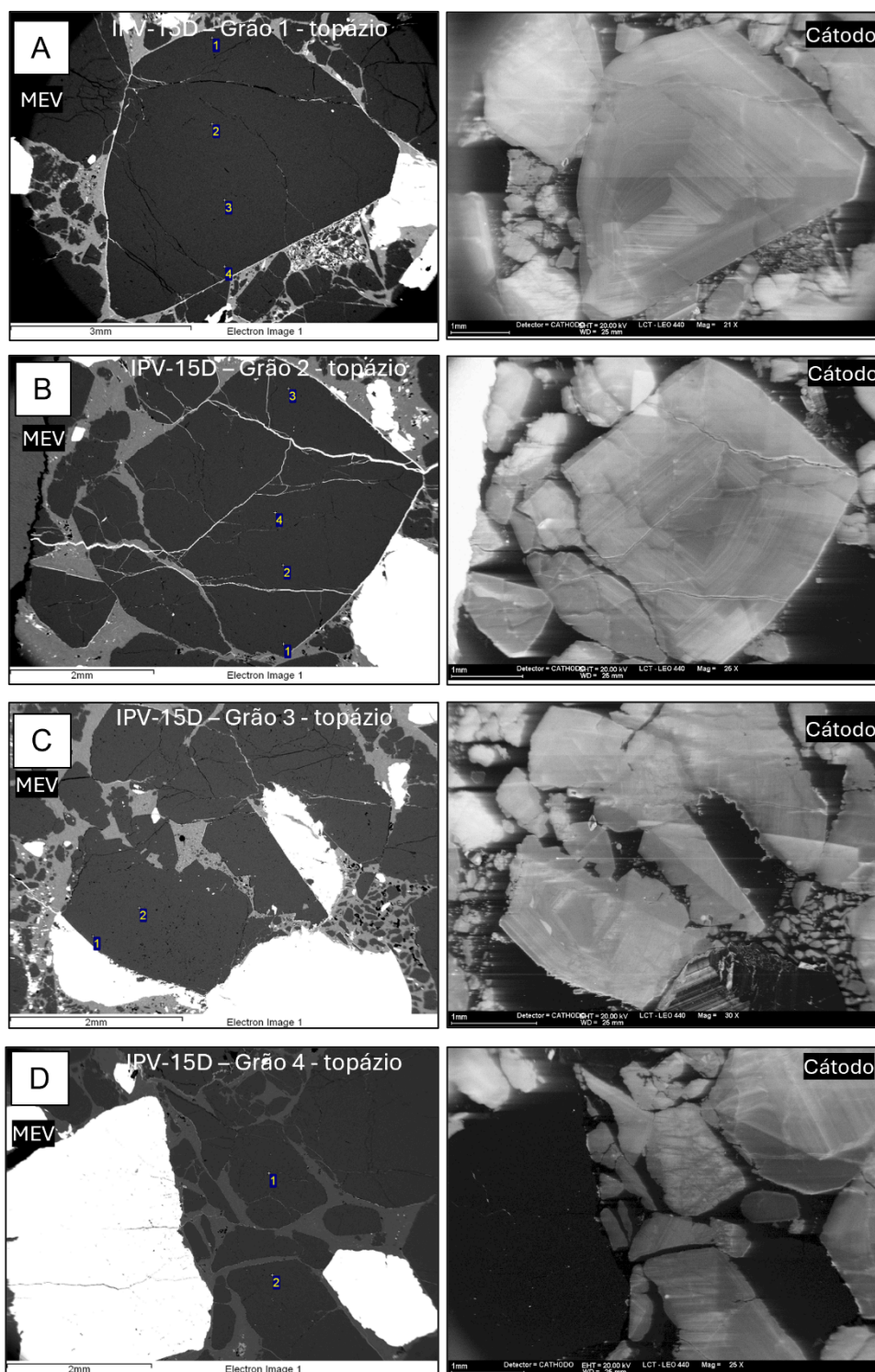


Figura 24. Imagens BSE-MEV e catodoluminescência de topázio da amostra IPV-15D. Todos os grãos de topázio mostram zoneamento oscilatório nas imagens de cátodo. Essa mesma característica não é observada nas imagens BSE, indicando que essa feição pode estar associada aos elementos traço presentes nesse mineral. Os números na imagem de MEV correspondem aos pontos das análises químicas EDS-MEV, apresentadas no anexo 2.

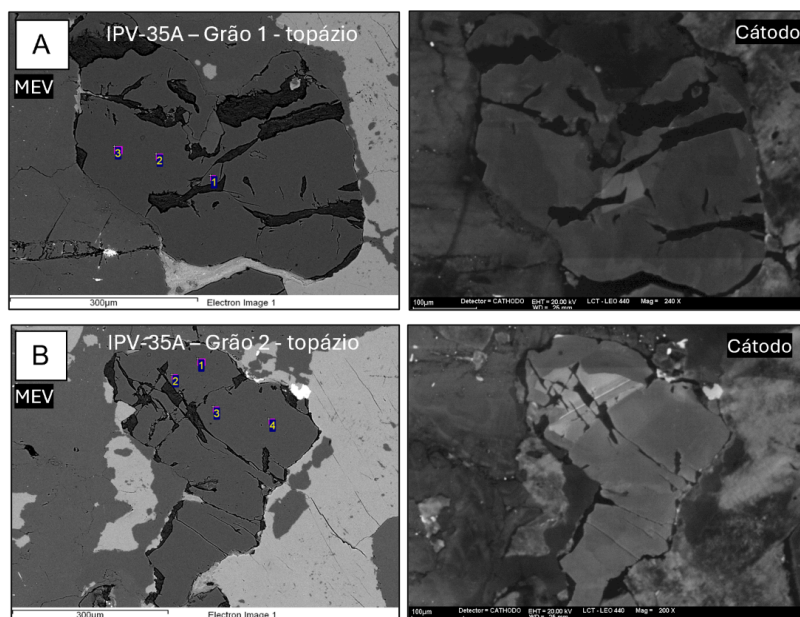


Figura 25. Imagens BSE-MEV e catodoluminescência de topázio da amostra IPV-35A. Todos os grãos de topázio mostram zoneamento oscilatório tendendo a manchado nas imagens de cátodo. Essa mesma característica não é observada nas imagens BSE, indicando que essa feição pode estar associada aos elementos traço presentes nesse mineral. Os números na imagem de MEV correspondem aos pontos das análises químicas EDS-MEV, apresentadas no anexo 2.

5.2.2 Mica

Os dados obtidos por WDS em microsonda eletrônica e LA-ICP-MS para as micas na matriz brechada do veio hidrotermal da amostra IPV-15D estão apresentados na Tabela 2. Os diagramas de classificação (Fig. 26) e os diagramas binários (Fig. 27) permitem a comparação desses resultados com os dados obtidos por Araújo (2018) e Araújo et al. (2020) para micas de outros litotipos do stock de Inhandjara. No diagrama de classificação de Tischendorf et al. (1997) (Fig. 26), as micas da amostra IPV-15D situam-se predominantemente no campo da fengita, semelhante às micas dioctaédricas descritas por Araújo (2018) para outros litotipos do stock de Inhandjara e seus veios associados. Em particular, as micas da amostra IPV-15D apresentam sobreposição com as micas do veio mineralizado em cassiterita (IPV-5B).

Nos diagramas binários (Fig. 27), observa-se uma relação não linear entre Nb e Ta nas micas da amostra IPV-15D, diferindo do restante dos dados do stock, que apresentam uma correlação clara entre esses elementos. Além disso, as micas da amostra IPV-15D mostram um enriquecimento significativo em W em comparação com as micas dos outros litotipos, com uma correlação positiva entre o teor de W e a razão Nb/Ta (Fig. 27C), um padrão que não é observado nas micas dos outros litotipos do stock Inhandjara. Esses dados indicam uma assinatura geoquímica distinta, sugerindo que as micas da amostra IPV-15D foram influenciadas por processos hidrotermais específicos, enriquecendo-as em elementos associados à mineralização de W.

Tabela 2 - Composição química da mica do veio mineralizado (IPV-15D) obtida por microsonda eletrônica e LA-ICP-MS.

Óxidos (wt%) - obtidos por microsonda eletrônica									
Amostra	IPV-15D	IPV-15D	IPV-15D	IPV-15D	IPV-15D	IPV-15D	IPV-15D	IPV-15D	IPV-15D
Grão	mica-01_01	mica-1_2	mica-1_3	mica-2_1	mica-2_2	mica-2_2R	mica-3_1	mica-3_2	mica-03_2R
SiO ₂	49,05	48,25	49,03	52,85	49,36	49,09	48,60	48,16	47,83
TiO ₂	0,00	0,10	0,11	0,04	0,05	0,05	0,04	0,02	0,08
Al ₂ O ₃	27,68	27,70	28,50	28,22	25,77	26,14	25,28	25,37	24,91
FeO	5,40	5,46	3,80	5,98	4,85	5,13	5,24	4,93	5,84
MnO	0,67	0,73	0,50	0,53	0,39	0,45	0,54	0,54	0,55
MgO	2,38	2,39	2,40	2,99	2,86	2,66	2,77	2,66	2,80
CaO	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Na ₂ O	0,04	0,06	0,08	0,02	0,05	0,05	0,04	0,06	0,06
K ₂ O	8,73	9,04	10,85	5,09	10,51	9,91	9,42	9,30	9,58
BaO	0,09	0,03	0,04	0,05	0,14	0,05	0,06	0,08	0,11
ZnO	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
F	0,80	0,67	0,55	1,07	0,72	0,76	0,78	0,80	0,92
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Li ₂ O*	0,29	0,23	0,18	0,43	0,25	0,27	0,28	0,29	0,35
H ₂ O*	4,04	4,06	4,19	4,12	4,03	4,00	3,93	3,88	3,82
O=F,Cl	0,33	0,28	0,23	0,45	0,30	0,32	0,33	0,34	0,39
Total	98,88	98,45	100,01	100,96	98,71	98,24	96,67	95,77	96,49

Proporção atômica (átomos por fórmula unitária) – com base em 22 ânions de oxigênio									
Si	6,66	6,61	6,61	6,85	6,77	6,75	6,78	6,78	6,73
Al ^{IV}	1,34	1,39	1,39	1,15	1,23	1,25	1,22	1,22	1,27
Al ^{VI}	3,10	3,08	3,14	3,16	2,94	2,98	2,94	2,98	2,87
Ti	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
Fe	0,61	0,63	0,43	0,65	0,56	0,59	0,61	0,58	0,69
Mn	0,08	0,08	0,06	0,06	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07
Mg	0,48	0,49	0,48	0,58	0,58	0,55	0,58	0,56	0,59
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
K	1,51	1,58	1,87	0,84	1,84	1,74	1,68	1,67	1,72
Ba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
Zn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F	0,34	0,29	0,23	0,44	0,31	0,33	0,34	0,35	0,41
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Li*	0,16	0,13	0,10	0,22	0,14	0,15	0,16	0,16	0,20
OH*	3,66	3,71	3,77	3,56	3,69	3,67	3,66	3,65	3,59
Fe/Fe+Mg	0,56	0,56	0,47	0,53	0,49	0,52	0,51	0,51	0,54

Elementos traços (ppm) - obtidos por LA-ICPMS									
Li	2491	2361	2331	3997	3718		3228	3032	
Nb	11,60	45,40	68,94	3,65	4,46		20,18	15,62	
Ta	5,30	16,41	10,09	3,57	3,40		3,95	3,35	
Nb/Ta	2,19	2,77	6,83	1,02	1,31		5,11	4,66	
Sn	179	190	181	196	191		189	170	
W	240	773	1363	30,74	229		1195	1233	

* Cálculo de H₂O de acordo com Tindle e Webb (1990); cálculo de Li₂O de acordo com Tischendorf (1997).

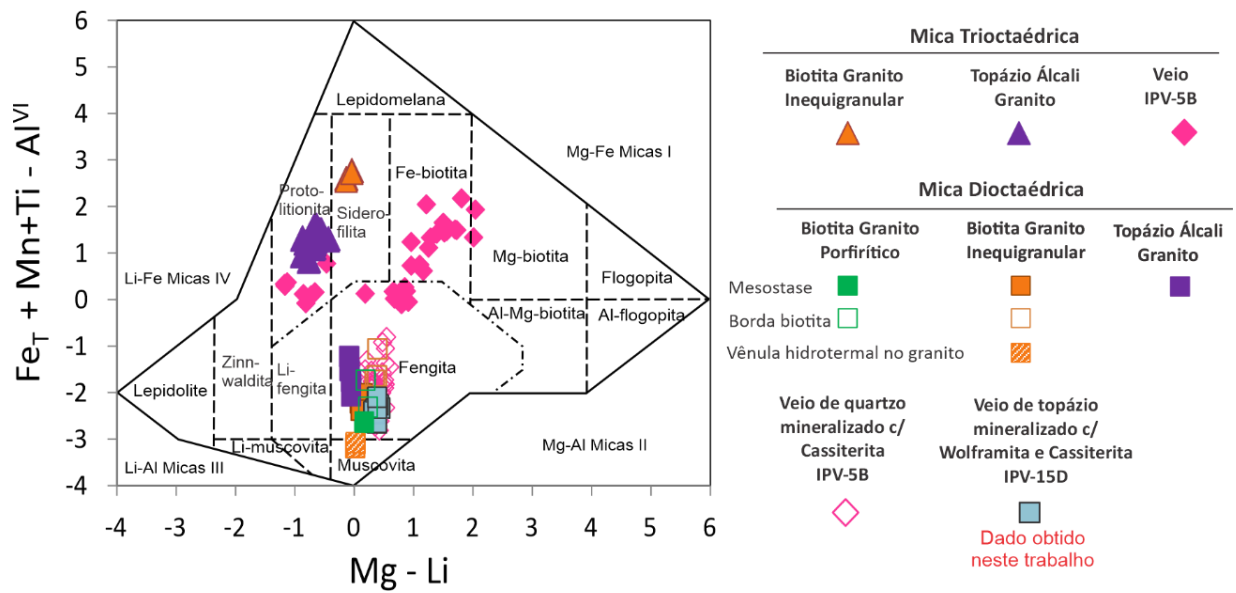


Figura 26. Diagrama de discriminação das micas ($\text{Fe total} + \text{Mn} + \text{Ti} - \text{Al}^{\text{VI}}$ versu $\text{Mg} - \text{Li}$) dos Granitos Inhandjara e dos veios mineralizados em wolframita e cassiterita associados de acordo com Tischendorf et al. (1997). Modificado de Araújo (2018). Todos os dados, exceto os do veio de topázio mineralizado com wolframita e cassiterita (amostra IPV-15D), foram obtidos por Araújo (2018).

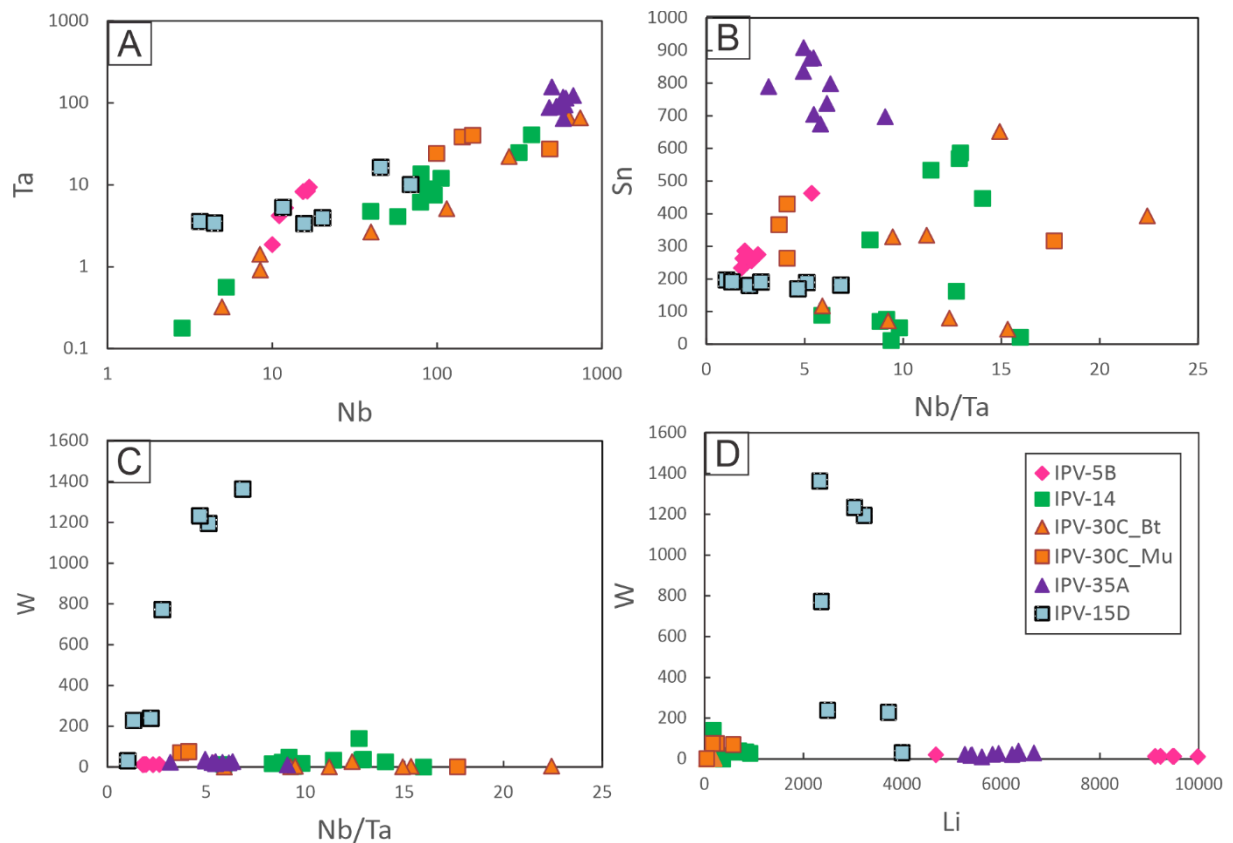


Figura 27. Diagramas binários de elementos traço obtidos por LA-ICPMS para as micas dos granitos Inhandjara e dos veios mineralizados em W-Sn associados. (A) Ta-Nb, (B) (A) Sn-Nb/Ta, (C) W-Nb/Ta e (C) W-Li. Todos os dados, exceto os do veio de topázio mineralizado com wolframita e cassiterita (amostra IPV-15D), foram obtidos por Araújo (2018) e Araújo et al (2020). A legenda detalhada dos símbolos pode ser vista na Figura 25.

5.2.3 Cassiterita

As imagens de catodoluminescência (Fig. 28) revelam um zoneamento oscilatório no cristal euédrico de cassiterita da amostra IPV-15D. A composição semi-quantitativa dessa cassiterita apresenta pouca variação em relação ao seu principal componente (SnO_2), mas mostra teores de Nb_2O_5 entre 0,2% e 0,9% (Anexo 2). A análise de elementos traço obtida por LA-ICP-MS (Tabela 3) revela, por meio de perfis borda-borda, um enriquecimento em Nb, Ta e W nas zonas mais ricas em ferro (mais escuras nas imagens BSE), que geralmente correspondem às porções mais oxidadas do cristal (Fig. 29).

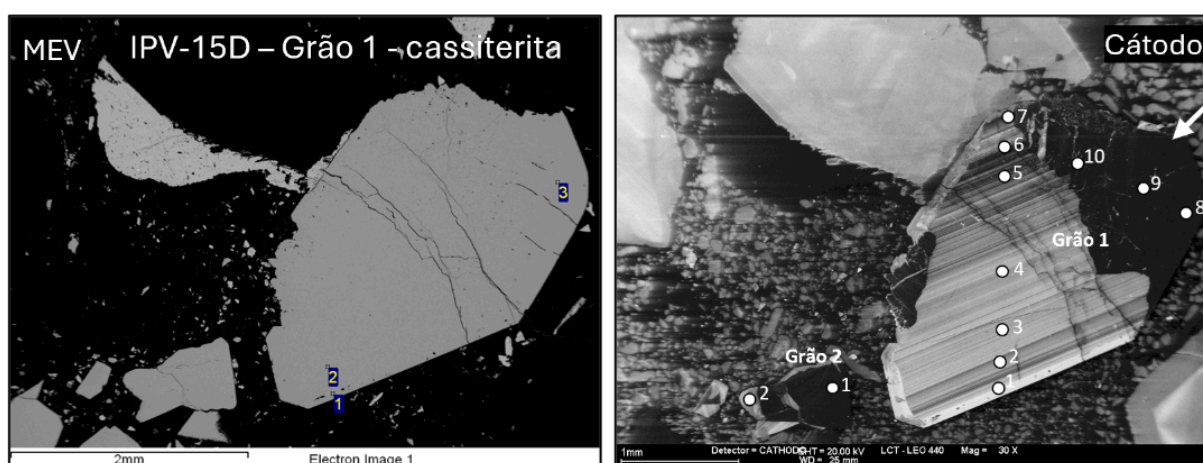


Figura 28. Imagens BSE-MEV e catodoluminescência da cassiterita da amostra IPV-15D. A cassiterita mostra zoneamento oscilatório bem-marcado, em quase todo o cristal, nas imagens de cátodo; porém numa das porções do grão não ocorre o efeito de catodoluminescência, devido à oxidação do grão. O zoneamento da cassiterita não é observado nas imagens BSE, indicando que essa feição pode estar associada aos elementos traços presentes nesse mineral. Os números na imagem de BSE correspondem aos pontos das análises químicas EDS-MEV, e os números na imagem de cátodo correspondem aos das análises de LA-ICPMS, respectivamente apresentados no Anexo 2 e na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição dos elementos traço (ppm) da cassiterita do veio mineralizado (IPV-15D) determinada por LA-ICP-MS.

Elementos (ppm)	G1-1	G1-2	G1-3	G1-4	G1-5	G1-6	G1-7	G1-8	G1-9	G1-10	G2-1	G2-2
Li	<0,24	<0,28	<0,27	<0,27	<0,27	<0,27	<0,29	<0,27	<0,29	<0,27	<0,26	2,8
Mg	<0,34	0,42	<0,37	0,77	<0,42	1,05	0,63	<0,41	0,59	<0,36	0,47	9,53
Al	1,9	10,3	13,77	12,06	16,3	30,49	23,46	4,86	5,16	6,99	8,37	118,26
SC	16,46	32,45	28,37	23,82	26,49	33,02	30	62,19	56,88	57,23	57,9	19,74
Ti	960,0	1907	2307	2544	1887	2053	2283	1487	1697	1944	2033	590,5
V	38,49	18,83	22,63	22,89	16,32	18,56	15,78	18,88	18,36	21,65	22,61	18,6
Mn	6,61	10,61	9,59	10,2	13,39	28,84	13,84	96,37	80,45	92,13	84,18	15,92
Fe	210,0	378,8	366,7	353,6	405,2	673,1	468,6	1114,1	904,9	996,1	927,2	452,5
Co	13,44	13,39	13,91	14,1	13,92	13,37	13,85	14,41	13,8	14,48	14	13,48
Ni	84,84	90,52	87,84	89,98	87,8	91,04	93,09	93,83	92,1	97,01	91,86	93,46
Cu	<0,194	<0,24	<0,25	<0,22	<0,223	1	<0,26	<0,24	<0,29	0,31	<0,27	2,83
Zn	1,5	<1,69	1,71	<1,79	<1,73	3,64	<1,91	<1,60	<2,08	<1,65	<1,89	8,94
Ga	0,47	2,77	3,21	2,36	2,39	3,24	2,67	1,62	1,44	1,71	1,94	0,343
Ge	<0,26	<0,88	<0,55	<0,63	<0,82	<0,83	<0,68	<0,63	<0,78	<0,89	<0,85	<0,97
Rb	<0,182	<0,197	<0,187	<0,202	<0,190	<0,172	<0,180	<0,194	<0,200	<0,193	<0,206	2,78
Sr	<0,072	<0,056	<0,071	0,071	<0,059	0,202	<0,055	<0,066	<0,053	0,063	<0,056	<0,068
Y	<0,085	<0,088	<0,087	<0,095	<0,087	<0,100	0,078	<0,086	<0,093	<0,089	<0,092	0,094
Zr	54,47	132,1	169,8	193,9	239,4	295,4	303,4	170,1	190,9	228,7	231,6	61,35
Nb	257,5	647,8	707,7	643,2	505,9	988,8	501,1	6446	4601	4624	4190,2	238,71
Mo	<0,52	<0,52	<0,49	<0,49	<0,43	<0,49	<0,42	<0,45	<0,54	<0,47	<0,55	0,49
Cd	1,23	1,89	1,69	1,09	1,17	1,39	1,55	<0,94	<0,98	1,77	1,31	<1,17
In	2998	2998	3022	3039	3023	2998	3022	2979	3040	3030	3020	2989
Sb	8,67	8,62	8,8	8,00	8,67	8,68	8,89	9,01	8,68	8,14	7,85	8,63
Cs	24,73	24,53	24,5	24,92	24,21	24,57	24,79	26,16	25,46	25,15	25,18	24,68
Ba	16,46	15,82	16,79	16,3	15,88	16,59	15,66	17,05	16,27	16,99	16,05	15,6
La	0,329	0,355	0,33	0,335	0,287	0,389	0,302	0,322	0,39	0,304	0,315	0,335
Ce	20,19	20,32	20,32	20,19	19,55	21,03	19,7	21,39	20,82	20,91	20,74	19,99
Pr	0,38	0,257	0,315	0,343	0,341	0,346	0,311	0,3	0,31	0,299	0,29	0,326
Nd	<0,123	<0,153	<0,130	<0,110	<0,197	<0,150	<0,106	<0,186	<0,249	<0,29	<0,179	0,189
Sm	<0,083	<0,252	<0,151	<0,201	<0,122	0,241	<0,212	<0,195	<0,256	<0,204	<0,224	<0,183
Eu	0,038	<0,054	0,042	<0,039	<0,046	<0,059	<0,046	<0,075	<0,048	<0,048	0,059	<0,061
Gd	<0,143	<0,188	<0,226	<0,174	<0,150	0,228	0,186	<0,200	<0,157	0,325	<0,211	0,125
Tb	0,025	0,02	<0,031	<0,039	0,024	0,029	<0,034	0,029	<0,044	0,031	<0,030	<0,042
Dy	<0,148	<0,130	<0,090	<0,131	0,114	<0,115	<0,126	<0,146	<0,132	<0,108	<0,094	<0,108
Ho	<0,031	<0,019	0,0162	<0,031	0,0132	<0,026	<0,026	<0,030	0,027	<0,024	<0,028	0,026
Er	<0,079	<0,085	<0,105	0,067	<0,098	<0,074	0,085	<0,053	<0,067	<0,078	<0,111	<0,070
Tm	<0,023	<0,025	<0,025	<0,018	<0,027	<0,032	<0,021	<0,021	<0,026	0,021	<0,039	<0,028
Yb	<0,160	<0,172	0,084	<0,151	<0,188	0,315	<0,189	<0,190	<0,198	<0,155	<0,20	0,155
Lu	<0,034	<0,031	<0,024	0,02	<0,030	<0,030	0,034	<0,043	<0,040	0,034	<0,035	<0,022
Hf	23	29,49	33,04	47,03	108,98	116,1	128,83	34,89	41,75	58,18	58,21	43,9
Ta	839,4	658,8	354,2	510,8	1314,5	1920,2	1345,3	2138,6	2977,2	3596,8	3729,5	1158,5
W	0,91	2,96	3,84	4,25	6,16	51,63	8,02	41,94	27,1	23,22	22,64	202,95
Pb	0,14	<0,18	<0,19	0,50	0,43	2,76	0,87	1,22	0,74	1,12	0,82	10,99
Bi	0,022	<0,036	<0,025	0,031	<0,036	0,399	<0,025	<0,048	0,02	<0,063	<0,027	1,55
Th	<0,04	<0,03	<0,03	<0,02	<0,02	0,18	0,01	<0,02	<0,01	<0,01	<0,02	0,27
U	0,179	0,44	0,671	1,2	1,79	2,88	2,35	2,77	2,33	3,1	2,87	0,19
ΣETR	20,96	20,95	21,11	20,96	20,33	22,58	20,62	22,04	21,55	21,92	21,40	21,15
Nb/Ta	0,3	1,0	2,0	1,3	0,4	0,5	0,4	3,0	1,5	1,3	1,1	0,2
Zr/Hf	2,4	4,5	5,1	4,1	2,2	2,5	2,4	4,9	4,6	3,9	4,0	1,4

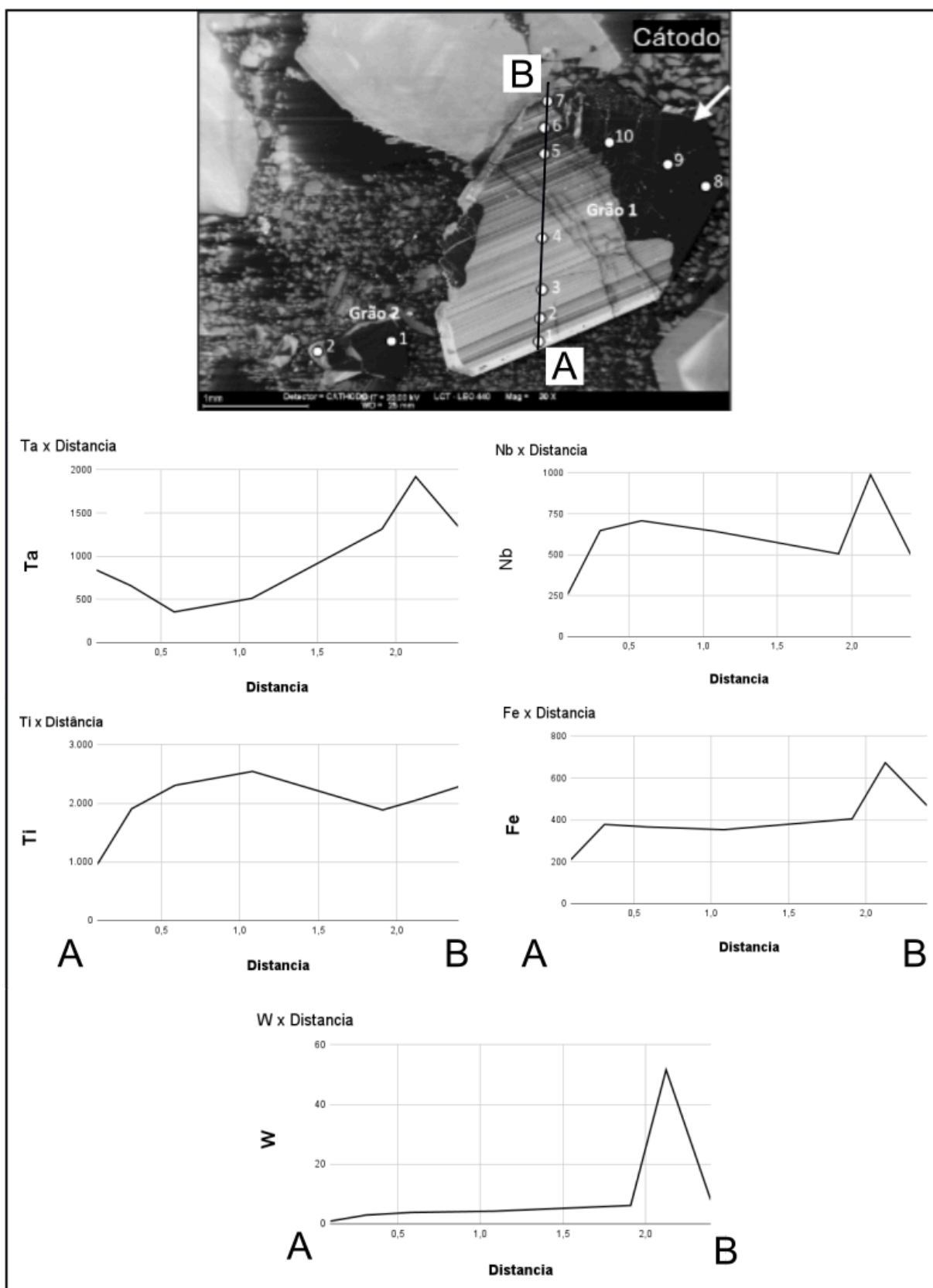


Figura 29. Variação de Ta, Nb, Ti, Fe e W ao longo do perfil A-B no cristal G1 de Cassiterita com zoneamento oscilatório. Os diagramas foram esquematizados a partir dos dados de elementos traço obtidos a partir dos pontos G1-1 a G1-7.

5.2.4 Wolframita

As imagens BSE e de catodoluminescência dos cristais de wolframita (Fig. 30) revelam a ausência de zoneamento neste mineral. As análises semi-quantitativas e de elementos traço indicam um enriquecimento significativo em manganês em relação ao ferro, caracterizando a fase mineral como predominantemente composta por hübnerita (MnWO_4), com MnO representando cerca de 70% e FeO (FeWO_4) aproximadamente 30% (Anexo 2). Os dados de elementos traço obtidos por LA-ICP-MS estão apresentados na Tabela 4. A Figura 31 mostra que o padrão de ETR na wolframita é enriquecido em elementos terras raras pesados (ETRP), variando de 4,22 a 185 ppm entre Gd e Lu, e empobrecido em elementos terras raras leves (ETRL), com concentrações variando de <0,03 ppm (abaixo do limite de detecção) a 6,31 ppm entre La e Eu, e exibindo anomalia negativa de Eu moderada. Esse padrão contrasta com o observado para os litotipos do granito Inhandjara, que apresentam um padrão de ETR relativamente plano, sem enriquecimento significativo em ETRP ou ETRL. A wolframita apresenta também valores elevados de $\Sigma\text{ETR}+\text{Y}$, variando entre 259 e 532,8 ppm.

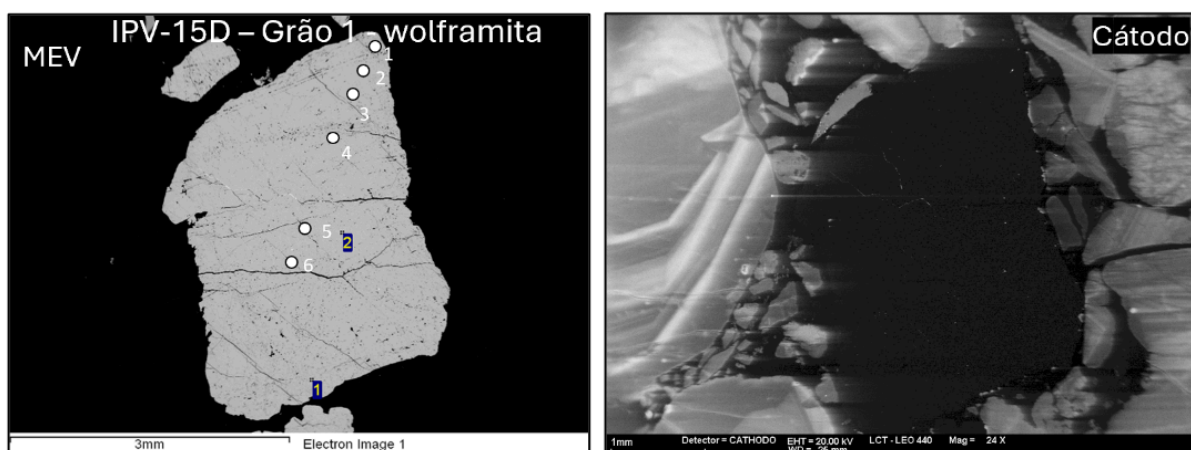


Figura 30. Imagens BSE-MEV e catodoluminescência da wolframita da amostra IPV-15D. A wolframita não apresenta zoneamento ou catodoluminescência. Os números na imagem de MEV correspondem aos pontos das análises químicas EDS-MEV (quadrado) e LA-ICPMS (círculo), respectivamente apresentados no Anexo 2 e na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição dos elementos traço (ppm) da wolframita do veio mineralizado (IPV-15D) determinada por LA-ICP-MS.

Elementos (ppm)	G1-1	G1-2	G1-3	G1-4	G1-5	G1-6	G2-1	G3-1	G3-2	G3-3	G4-1	G4-2	G4-3	G4-4	G4-5
Li	0,66	1,47	<0,31	1,01	<0,37	1,32	1,01	10,74	<0,46	0,74	<0,39	<0,40	<0,42	0,47	<0,38
Mg	20,17	22,99	22,41	19,15	21,09	23,42	26,08	50,76	21,87	21,05	22,97	20,33	20,74	16,36	15,65
Al	147,2	1130	9,73	1113	18,53	424	261,4	379,1	15,17	172,2	2,29	5,94	8,54	8,77	<2,16
SC	221,4	208,9	187,4	180,1	197,2	181	188,6	142,9	160,1	193,6	163,4	188,8	171,8	173,4	153,7
Ti	114,4	98,26	109,2	71,76	78,38	117,9	121,5	108,5	37,47	103,1	42,39	42,66	69,42	28,35	46,31
V	0,72	1,29	1,21	0,75	0,81	0,84	1,21	0,86	0,61	2,53	0,4	0,54	0,59	0,44	0,232
Co	0,2	<0,11	0,22	0,16	0,14	0,12	<0,13	0,36	0,23	0,39	0,13	<0,12	0,39	0,31	0,33
Ni	<0,32	<0,40	<0,36	<0,22	<0,29	0,35	<0,43	<0,36	<0,33	<0,45	<0,33	<0,58	<0,43	<0,38	<0,27
Cu	2,75	3,26	1,1	2,19	0,25	1,57	6,65	9,7	1,89	5,99	0,26	0,38	<0,37	<0,30	<0,33
Zn	76,78	128,2	117,3	123,3	96,97	83,76	327,9	149,6	336,9	868,3	92,9	98,44	110,7	108,4	97,04
Ga	36,3	34,31	34,18	35,32	33,65	33,25	32,26	33,57	30,66	33,07	33,23	33,22	33,06	35,68	33,97
Ge	1,86	3,34	1,71	1,44	2,7	1,38	2,55	3,23	2,27	2,96	1,88	1,96	4,51	2,61	2,06
Sr	0,52	0,63	<0,09	0,29	0,08	0,27	1,36	0,42	0,35	1,46	0,13	0,40	0,23	<0,08	<0,11
Y	43,24	48,34	85,18	65,35	77,94	48,17	53,04	42,98	52,26	73,85	53,03	64,61	42,04	45,3	40,93
Zr	118,6	112,1	119,2	85,79	99,98	91,36	104	65,85	57,04	117,6	49,09	67,15	59,52	75,65	48,1
Nb	7008	6876	8556	7495	6417	7018	6886	5608	3054	6502	3162	3534	5085	5324	4179
Mo	2,26	9,07	2,39	6,63	2,35	4,19	4,35	8,55	6,76	11,66	3,17	3,57	6,17	5,57	5,26
Cd	3,18	3,64	2,39	2,02	1,14	1,8	13,1	4,2	15,6	46,63	0,62	<1,29	<1,04	<1,48	<1,23
In	17,04	16,37	11,62	10,8	10,92	12,56	14,59	9,83	9,63	13,35	8,79	9,53	4,88	4,35	3,88
Sn	511,2	391,6	441,2	306,8	334,5	312,6	418,7	181	160,9	338,2	132,7	176,1	134	207,1	129
Sb	0,23	0,26	<0,26	<0,20	<0,23	<0,201	<0,24	<0,23	<0,28	0,43	<0,213	<0,26	<0,23	<0,26	<0,24
Cs	0,07	0,04	<0,04	<0,03	<0,05	0,05	1,08	0,32	<0,03	<0,04	<0,04	<0,05	<0,07	0,07	<0,03
Ba	0,91	2,92	<0,40	0,58	<0,47	1,22	4,8	3,73	1,87	4,99	<0,51	0,85	0,62	<0,48	<0,63
La	0,527	0,608	0,089	0,212	<0,034	0,16	0,716	0,424	0,162	1,67	<0,03	<0,05	0,07	0,09	<0,04
Ce	1,22	1,19	0,28	0,38	0,10	0,40	4,35	1,42	1,15	4,97	0,10	0,21	0,40	0,54	0,13
Pr	0,20	0,22	0,10	0,08	0,06	0,08	0,27	0,21	0,19	1,15	0,07	0,08	0,08	0,14	0,07
Nd	1,31	0,71	0,79	0,71	0,61	0,52	1,71	1,08	1,44	4,94	0,55	0,67	0,76	0,87	0,7
Sm	1,55	1,83	2,49	3,5	2,85	1,55	2,7	2,69	3,1	6,31	2,71	3,00	2,45	2,81	2,24
Eu	0,13	0,09	0,20	0,09	0,23	0,09	0,14	0,13	0,12	0,30	<0,09	0,13	0,08	<0,10	0,1
Gd	3,57	4,63	8,15	7,12	7,48	4,62	5,33	4,18	6,19	9,97	5,52	6,66	5,08	5,69	4,77
Tb	2,22	2,56	4,72	4,06	4,07	2,82	3,11	2,97	3,55	5,38	3,99	4,22	3,57	3,44	2,69
Dy	26,87	29,4	53,86	45,46	46,91	32,97	37,76	33,77	40,55	59,88	39,56	45,88	40,59	40,72	32,57
Ho	7,39	7,97	13,58	12,05	13,13	9,23	9,47	9,26	10,15	15,18	9,71	11,77	9,52	10,12	8,53
Er	33,37	37,53	60,15	50,13	55,75	37,04	39,35	41,77	44,36	67,03	43,34	49,83	46,1	46,08	40,2
Tm	9,74	10,16	15,15	13,86	15,15	10,1	10,87	11,82	13,32	19,82	12,25	14,02	15,25	14,21	11,54
Yb	110,2	116,7	168	150,6	163	111,5	121,3	145,5	152,9	227,9	139,2	167,5	185	176,8	145
Lu	17,49	18,64	26,25	22,98	25,24	16,91	17,91	22,01	24,21	34,51	20,55	25,42	28,83	26,94	21,03
Hf	14,17	14,83	13,86	9,87	10,9	11,33	11,19	8,05	5,99	11,69	4,97	7,23	5,43	8,8	4,75
Ta	1239	1237	888,1	1388	615	1161	1455	1001	999,7	1368	695,1	920,9	514,8	1092	526,4
Pb	223,5	183,8	36,52	44,16	8,58	58,80	1695	118,0	208,3	619,4	4,90	19,40	26,11	33,56	8,04
Bi	6,36	3,61	0,92	0,83	0,31	0,90	27,68	7,87	3,56	16,13	0,36	0,40	0,35	0,43	0,41
Th	3,38	3,58	1,77	1,49	0,99	1,75	2,39	2,58	1,22	2,62	0,58	1,10	1,41	1,56	0,74
U	47,21	62,34	74,99	60,84	49,81	54,96	78,94	39,17	35,68	105,71	22,90	35,47	62,10	52,35	40,95
ΣETR	215,8	232,2	353,8	311,3	334,6	228	255	277,3	301,4	459	277,5	329,4	337,8	328,4	269,6
ΣETR+Y	259,0	280,5	439,0	376,6	412,5	276,1	308,0	320,3	353,7	532,8	330,5	394,0	379,8	373,7	310,5
Nb/Ta*	0,42	0,42	0,72	0,4	0,78	0,45	0,35	0,42	0,23	0,36	0,34	0,29	0,74	0,37	0,60
Y/Ho*	0,23	0,24	0,25	0,21	0,23	0,21	0,22	0,18	0,20	0,19	0,22	0,22	0,17	0,18	0,19
Zr/Hf	8,4	7,6	8,6	8,7	9,2	8,1	9,3	8,2	9,5	10,1	9,9	9,3	11,0	8,6	10,1

*Valores padronizados para a composição da crosta continental (Rudnick e Gao, 2003)

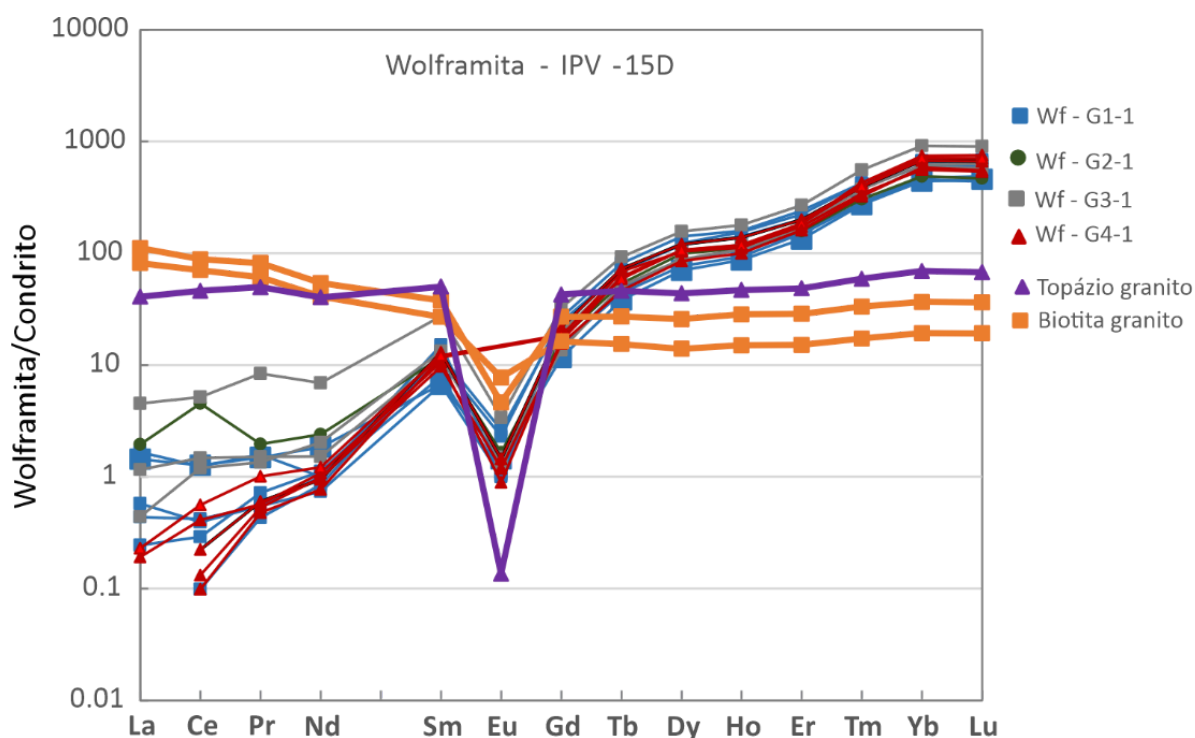


Figura 31. Padrões de Elementos Terras Raras (ETR) da wolframita do veio mineralizado IPV-15D, obtidos por LA-ICPMS e normalizados em relação ao condrito (valores de Taylor e McLennan, 1985). Os teores de ETR do biotita granito e do topázio granito de Inhandjara, conforme apresentados por Araújo (2018), também estão plotados.

5.3 Caracterização Textural e Mineralógica das Amostras

As imagens de mapeamento por microfluorescência de raios X (μ FRX) revelam de forma clara as características texturais e mineralógicas das duas amostras analisadas, aspectos que são difíceis de serem observados apenas pela análise microscópica convencional (Fig. 32). Na amostra do veio de topázio e wolframita (IPV-15D; Fig. 32A), as imagens mostram uma textura brechada, com quartzo ocorrendo de forma restrita, o que sugere um ambiente de formação complexo, possivelmente envolvendo múltiplas fases. Na amostra do granito Inhandjara (IPV-35A; Fig. 32B), o mapeamento revela uma distribuição homogênea de grãos de fluorita ao longo da lâmina, além da presença esparsa de topázio. Tanto a fluorita quanto o topázio no granito ocorrem como grãos anédricos e intersticiais à mineralogia principal, o que indica sua cristalização em uma fase mais tardia do processo magmático.

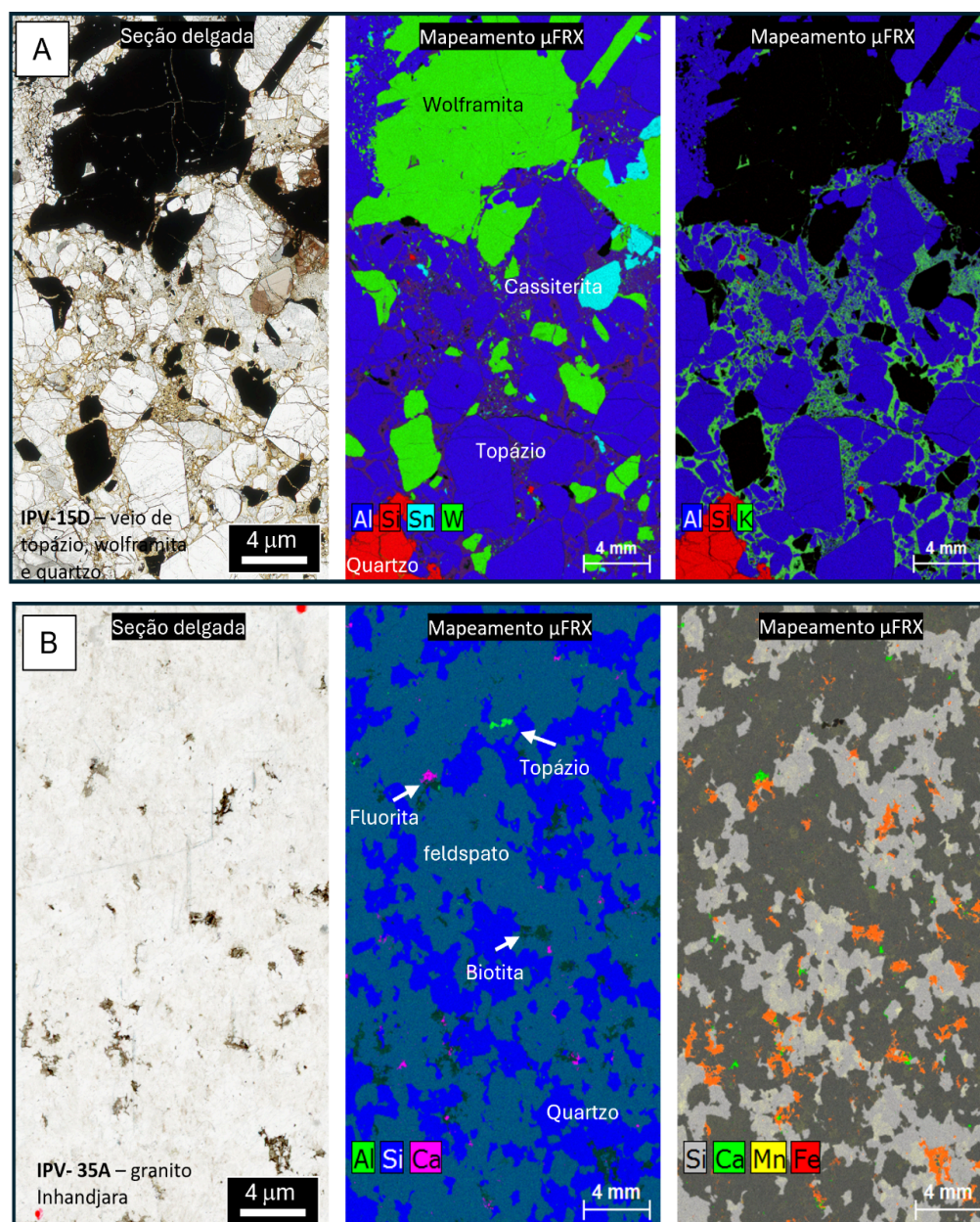


Figura 32. Imagens escaneadas das seções polidas e mapeamentos obtidos por microfluorescência de raios X das amostras estudadas (**item A**, amostra IPV-15D) e granito Inhandjara (**item B**, amostra IPV-35A). Em cada item (A e B), a imagem à esquerda mostra a lâmina escaneada, enquanto as imagens centrais e à direita apresentam o mapeamento por microfluorescência de raios X com mistura de elementos químicos da mesma área anterior.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Petrografia e microtermometria de inclusões fluidas

Os dados obtidos pela análise de microtermometria das inclusões fluidas presentes nos dois cristais de topázio mostram a existência de três tendências (T1, T2 e T3) por meio da variação de salinidade e Th (Fig. 15). O comportamento observado para as inclusões primárias e pseudosecundárias em T1 e T2 descrevem uma ampla variação da salinidade em dois intervalos distintos e restritos de Th, esse comportamento é usualmente interpretado na literatura como uma mistura isothermal entre um fluido de origem magmática

de maior salinidade e um fluido de origem meteórica de menor salinidade (e.g., Bettencourt et al., 2005, Borges et al., 2009, Pan et al., 2019 e Wilkinson, 2001). Porém, no caso das inclusões analisadas neste estudo, as variações de Th e salinidade ao longo dos perfis apresentados no tópico 5.1.3 sugerem que TPZ-I e TPZ-II cristalizaram simultaneamente a partir de fluidos heterogêneos com valores de salinidade em termos de wt.% NaClep. completamente distintos, demonstrando a coexistência de ao menos duas fases fluidas distintas no início da cristalização, além disso as tendências descritas pela variação dos parâmetros ao longo dos perfis sugerem trajetórias de evolução da fase fluida com aumento de Th e diminuição da salinidade para os dois fluidos. Em termos de salinidade, o fluido aprisionado em TPZ-I menos salino varia de 4 a 2 wt.% NaClep. no sentido núcleo-borda, enquanto que o fluido aprisionado em TPZ-II mais salino varia de 16 a 8 wt.% NaClep. também no sentido núcleo-borda. Já em termos de Th, ambos os fluidos apresentam trajetórias semelhantes variando aproximadamente entre 200 e 250 °C, indicando uma evolução relativamente constante nas condições de pressão e temperatura.

Considerando que as inclusões presentes nos dois cristais são todas aquosas e bifásicas, o cenário que melhor justifica esse comportamento é a entrada de um fluido menos salino e mais quente de provável origem magmática no sistema interagindo com ambas as fases fluidas e causando uma diluição da salinidade com aquecimento moderado e progressivo, além disso ao longo dos perfis é possível verificar diferentes comportamentos de variação dos dados e inflexões pontuais nos valores de salinidade e Th entre as zonas de crescimento de ambos os topázios, indicando que embora a trajetória núcleo-borda seja relativamente contínua em ambos os cristais, variações nas condições de aprisionamento do fluido podem ter ocorrido, o predomínio de zoneamento oscilatório nos topázios do veio reforça essa possibilidade e pode refletir essas pequenas variações na composição da fase fluida ou das condições de formação do cristal ao longo das zonas de crescimento, atribuindo complexidade e dinamismo ao sistema hidrotermal.

Os dados de inclusões fluidas secundárias apresentam valores de salinidade que variam em torno de 0,5 a 11 wt.% NaClep. e de Th entre 142 e 221 °C, além disso esses dados também apresentam uma grande sobreposição com aqueles obtidos através da análise de inclusões fluidas primárias, isso pode indicar que algumas inclusões interpretadas como secundárias são na verdade primárias e distribuídas ao longo de trilhas que representam na verdade zonas de crescimento e neste caso a trajetória de diluição com resfriamento ocorre a partir do campo onde a evolução da fase fluida em TPZ-I e em TPZ-II se encontram no diagrama e está registrada apenas nas inclusões secundárias presentes em TPZ-I, ou então que a evolução da fase fluida ao longo desses fraturamentos é influenciada por uma outra forma de interação dos fluidos inicialmente presentes durante a cristalização com fluidos mais frios e menos salinos de provável origem meteórica, descrevendo uma trajetória de diluição (T3) distinta da trajetória de evolução do fluido

observada ao longo dos perfis núcleo-borda em inclusões primárias. Neste caso os fraturamentos teriam reaberto parcialmente o sistema e reequilibrado os fluidos aprisionados ao longo da cristalização de TPZ-I e TPZ-II a partir da circulação de um fluido mais frio e menos salino nessas fraturas. Ainda faltam indícios para relacionar diretamente a mineralização de Wolframita com qualquer um desses processos com precisão, pois o sistema hidrotermal é complexo e dinâmico e tanto a presença de fases fluidas com salinidades distintas no início da cristalização, quanto a interação dessas fases com fluidos menos salinos poderiam ser responsáveis por afetar a solubilidade de W.

A espectroscopia Raman revelou que algumas inclusões podem apresentar CO₂ na fase gasosa, porém ao longo da análise microtermométrica não foi possível identificar nucleação de clatrato, ou outras feições sugestivas da existência de inclusões aquo-carbônicas na amostra. Portanto, todas as inclusões foram classificadas e analisadas como aquosas e bifásicas.

A figura 33 reúne os dados obtidos nas análises deste estudo comparativamente com a compilação de dados apresentada em (Bodnar et al., 2014) para 2000 inclusões fluidas de 72 depósitos de W-Sn. Os dados compilados apresentam um padrão de distribuição bimodal em relação a salinidade e um padrão de distribuição aproximadamente Gaussiano para Th, esses padrões de distribuição não são discutidos pelo autor em maior detalhe. Os dados obtidos para este estudo apresentam uma sobreposição com os picos de maior frequência observados dentro do intervalo de 0 a 10 wt.% NaClep. para a salinidade e entre 150 e 300 °C para a Th. O intervalo de dados obtidos também é condizente com a compilação realizada em (Naumov et al., 2011) para mineralizações de W.

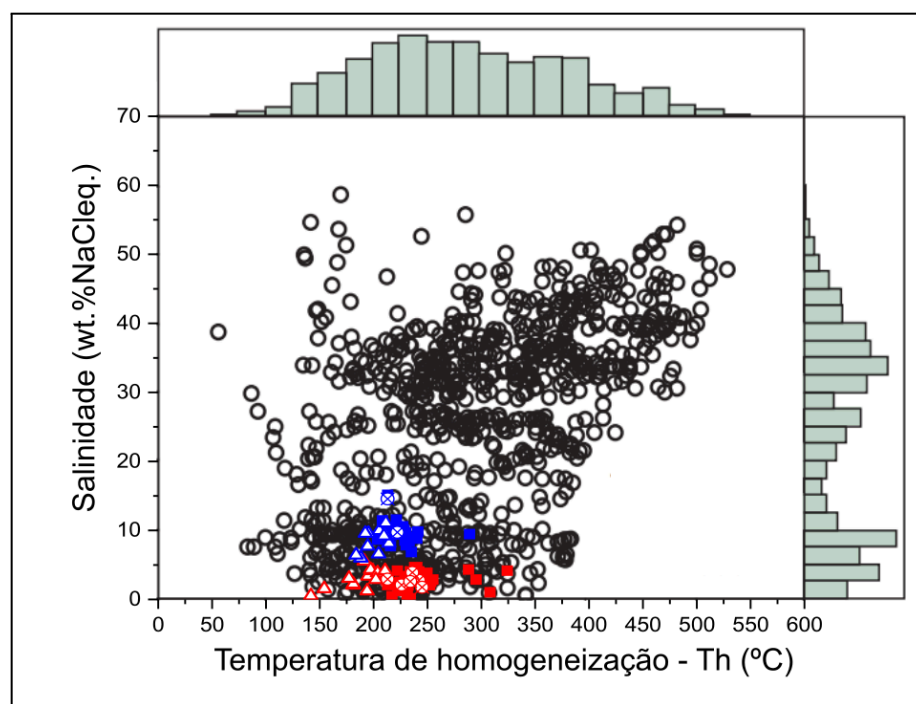


Figura 33. Relação dos dados obtidos através das análises realizadas neste estudo com o diagrama de temperatura de homogeneização - Th (°C) versus salinidade (wt.% NaClep.), com dados de 2000 inclusões fluidas analisadas em 72 depósitos de W-Sn do tipo pórfiro.

6.2 Caracterização e interpretação das fases minerais

As micas dioctaédricas na matriz brechada do veio hidrotermal foram classificadas como fengitas. Essas micas apresentam um enriquecimento em W quando comparadas às micas de outros litotipos associados ao granito Inhandjara, sugerindo que a fase hidrotermal responsável pela mineralização de W influenciou sua composição química. A razão Nb/Ta nas micas da amostra IPV-15D é semelhante à observada em micas de outros litotipos associados ao leucogranito Inhandjara, indicando uma conexão entre a fase fluida do veio e a evolução magmática do granito. Contudo, a trajetória da razão Nb/Ta nessas micas é não linear, possivelmente refletindo a maior mobilidade do Nb em um fluido ácido e rico em flúor, que favorece o enriquecimento em Ta, como também apontado por estudos de fluidos hidrotermais com alta acidez e presença de halogênios.

O zoneamento oscilatório observado nos topázios e cassiteritas do veio hidrotermal destaca a influência de elementos traços e reflete flutuações nas condições de cristalização ao longo da evolução do fluido. A análise de elementos traço por LA-ICP-MS ao longo do perfil A-B na cassiterita (Fig. 29) mostrou variações significativas nos elementos compatíveis com essa fase mineral. O perfil revela que zonas mais escuras na imagem de BSE estão enriquecidas em Fe e W, enquanto zonas mais claras exibem maior teor de Ta em relação ao Fe, comportamento semelhante ao descrito por Huang et al. (2023) para cassiteritas em contextos hidrotermais.

Na wolframita, as análises semi-quantitativas e de elementos traço indicam uma predominância de hubnerita ($\text{MnWO}_4 > 70\%$), conforme confirmado por uma baixa relação Fe/Mn, característica de wolframitas formadas em sistemas hidrotermais associados a magmas altamente evoluídos (Monnier et al., 2019). A wolframita apresentou valores elevados de $\Sigma\text{ETR}+\text{Y}$, variando entre 259 e 532,8 ppm, além de um padrão de ETR enriquecido em elementos terras raras pesados (ETRP) e empobrecido em elementos terras raras leves (ETRL), com uma anomalia negativa de Eu. Esse padrão de ETRP elevado e ETRL depletado é típico de wolframitas em contextos hidrotermais ricos em flúor e extremamente evoluídos (Harlaux et al., 2018). A incorporação preferencial de ETRP também pode estar relacionada às condições redox do sistema: conforme o ambiente hidrotermal passa de mais redutor para mais oxidante, esses elementos tendem a se incorporar na estrutura da wolframita, em vez de permanecerem na fase fluida, enriquecendo o mineral em ETRP.

7. CONCLUSÕES

O sistema hidrotermal associado à evolução magmática do granito Inhandjara revela um comportamento complexo e dinâmico. Os dados de inclusões fluidas em cristais de topázio do veio mineralizado (IPV-15D) indicam a presença inicial de dois fluidos aquosos, com salinidades distintas, que interagem com um fluido mais quente e menos salino,

resultando em trajetórias distintas de evolução. Ambos os cristais mostram um padrão de aumento de Th e diminuição de salinidade do núcleo para a borda. Posteriormente, a interação com um fluido mais frio e de menor salinidade ao longo de fraturamentos nos cristais pode ter provocado o reequilíbrio das inclusões, sugerindo uma diluição acompanhada de resfriamento e indicando a atuação contínua de uma fase fluida dinâmica e heterogênea.

A química mineral revela a presença de uma fase fluida altamente evoluída, ácida e rica em flúor, que variou em composição e condições de aprisionamento das inclusões e de cristalização dos minerais. Esses dados sugerem que a wolframita se formou a partir de um fluido hidrotermal derivado de um magma extremamente evoluído. Além disso, os dados também apontam para a possibilidade de um sistema dinâmico, com a atuação de processos como imiscibilidade entre fluidos aquosos e interação com outros fluidos de baixa salinidade ao longo da cristalização do Topázio no veio, ambos processos podem ter influenciado a solubilidade do W no fluido, favorecendo a deposição de hubnerita.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agangi, A., Gucsik, A., Nishido, H., Ninagawa, K. and Kamenetsky, V.S., 2016, Relation between cathodoluminescence and trace-element distribution of magmatic topaz from the Ary-Bulak massif, Russia. *Mineralogical Magazine*, 80(5), pp.881-899. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.023>
- Andrew, A.S., Heinrich, C.A., 1984, Isotopic and fluid inclusion evidence for sources of mineralizing fluids at the Sundown tin prospect, S.E. Queensland labs. *Geological Society of Australia Abstracts*, 12, 36–38.
- Araujo, F.P., 2018, O Leucogranito Inhandjara: um exemplo de diferenciação magmato-hidrotermal na província granítica Itu, SP (Brasil) [Dissertação de Mestrado]: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, <https://doi.org/10.11606/D.44.2018.tde-10092018-133358>.
- Araújo, F.P., Martins, L., Pereira, G. S., Janasi, V. A., 2020, Inhandjara topaz leucogranite: A late rare metal-mineralized stock within the A-type Itu batholith, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 101, 102623, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102623>.
- Archer, D.G., 1992, Thermodynamic properties of the NaCl + H₂O system: II. Thermodynamic properties of NaCl(aq), NaCl 2H₂O(cr), and phase equilibria. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 28, 1–17, <https://doi.org/10.1063/1.555888>.
- Assadzadeh, E.G., Samson, I., Gagnon, J., 2016, Evidence for aqueous liquid-liquid immiscibility in highly evolved tin-bearing granites, Mount Pleasant, New Brunswick, Canada *Chemical Geology*, 448, 23–39, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.11.016>.
- Audétat, A., Günther, D. and Heinrich, C.A., 2000a, Causes for large-scale metal zonation around mineralized plutons: Fluid inclusion LA-ICP-MS evidence from the Mole Granite, Australia. *Economic Geology*, 95(8), pp.1563-1581, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.8.1563>
- Audétat, A., Günther, D., Heinrich, C.A., 2000b, Magmatic-hydrothermal evolution in a fractionating granite: A microchemical study of the Sn-WF-mineralized Mole Granite (Australia). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(19), pp.3373-3393, [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00428-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00428-2).

- Bakker, R.J., 2003, Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 194(1-3), 3-23, [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(96\)00073-8.9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(96)00073-8.9)
- Bettencourt, J. S., Leite Jr., W. B., Goraieb, C. L., Sparrenberger, I., Bello, R. M., Payolla, B. L., 2005, Sn-polymetallic greisen-type deposits associated with late-stage rapakivi granites, Brazil: fluid inclusion and stable isotope characteristics. *Lithos*, 80(1-4), 363-386, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.03.060>
- Bodnar, R.J., 1993, Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3), 683-684, [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90378-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A).
- Bodnar, R., Lecumberri-Sanchez, P., Moncada, D., Steele-MacInnis, M., 2014, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, 2^a ed., 13, pp.119-142, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01105-0>.
- Borges, R. M. K., Villas, R. N. N., Fuzikawa, K., Dall'Agnol, R., Pimenta, M. A., 2009, Phase separation, fluid mixing, and origin of the greisens and potassic episyenite associated with the Água Boa pluton, Pitinga tin province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 27(2-3), 161-183, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2008.11.006>
- Burke, E.A., 2001, Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos*, 55(1-4), pp.139-158, [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00043-8).
- Burruss, R.C., 2003, Raman spectroscopy of fluid inclusions: In Samson, I., Anderson, A., and Marshall, D., eds., *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*, Short Course 32, Mineralogical Association of Canada, p. 279–289, <https://doi.org/10.3749/9780921294672.ch11>.
- Campos Neto, M.C., Caby, R., 2000, Terrane accretion and upward extrusion of high-pressure granulites in the Neoproterozoic nappes of southeast Brazil: Petrologic and structural constraints. *Tectonics*, 19(4), 669–687.C, <https://doi.org/10.1029/1999TC900065>.
- Candela, P.A., 1997, A Review of Shallow, Ore-related Granites: textures, volatiles and ore metals. *Journal of Petrology*, 38(12), 1619-1633, <https://doi.org/10.1093/petroj/38.12.1619>.
- Chen, L.-L., Ni, P., Li, W.-S., Ding, J.-Y., Pan, J.-Y., Wang, G.-G., Yang, Y.-L., 2018, The link between fluid evolution and vertical zonation at the Maoping tungsten deposit, Southern Jiangxi, China: Fluid inclusion and stable isotope evidence. *Journal of Geochemical Exploration*, 192, pp. 18-32, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.01.001>.
- Chen, G., Gao, J., Lu, J., et al., 2020. In situ LA-ICP-MS analyses of mica and wolframite from the Maoping tungsten deposit, southern Jiangxi, China. *Acta Geochimica*, 39, 811–829. <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00423-5>.
- Eadington, P.J., Kinealy, K., 1983. Some aspects of the hydrothermal reactions of tin during skarn formation. *Journal of the Geological Society of Australia*, 30, 461–471. <https://doi.org/10.1080/00167618308729270>.
- Frezzotti, M. L., Tecce, F., Casagli, A., 2012, Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112, 1–20, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>.
- Goldstein, R.H., 2003, Petrographic analysis of fluid inclusions: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, v. 32, p. 9–53, <https://doi.org/10.3749/9780921294672.ch02>.
- Goldstein R. H., Reynolds T. J., 1994, Fluid inclusion microthermometry Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals – SEPM Short Course 31, 1994, Oklahoma SEPM (Society for Sedimentary Geology) 87-121, <https://doi.org/10.2110/scn.94.31>

- Harlaux, M., Mercadier, J., Marignac, C., Peiffert, C., Cloquet, C., & Cuney, M., 2018, "Tracing metal sources in peribatholithic hydrothermal W deposits based on the chemical composition of wolframite: The example of the Variscan French Massif Central", *Chemical Geology*, v. 479, p. 58-85, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.11.012>.
- Hannah, J.L., and Stein, H.J., 1990, Magmatic and hydrothermal processes in ore-bearing systems: Geological Society of America Special Paper 246, p. 1-10. <https://doi.org/10.1130/SPE246-p1>.
- Heinrich, C. A., 1990, The chemistry of hydrothermal tin(-tungsten) ore deposition. *Economic Geology*, 85(3), 457–481, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.3.457>.
- Heinrich, C.A., Eadington, P.J., 1986. Thermodynamic predictions of the hydrothermal chemistry of arsenic, and their significance for the paragenetic sequence of some cassiterite-arsenopyrite-base metal sulfide deposits. *Economic Geology*, 81(3), 511–529. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.3.511>.
- Higgins, N.C., 1985, Wolframite deposition in a hydrothermal vein system; the Grey River tungsten prospect, Newfoundland, Canada: *Economic Geology*, v. 80, p. 1297-1327, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.5.1297>.
- Huang, W.-Q., Ni, P., Pan, J.-Y., Zhou, J.-G., Shui, T., Chen, H., Fan, M.-S., Cui, J.-M., Meng, F.-W., Ding, J.-Y., 2023, Relationship between cathodoluminescence response and trace element characterization of cassiterite from the Yunling tin deposit in western Yunnan, China: Implications for substitution mechanism and ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 161, 105610. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105610>
- Janasi, V. A., Vlach, S.R.F., Campos Neto, M.D.C., Ulbrich, H.H.G.J., 2009, Associated A-type subalkaline and high-K calc-alkaline granites in the Itu Granite Province, southeastern Brazil: petrological and tectonic significance. *The Canadian Mineralogist*. 47, 1505–1526, <https://doi.org/10.3749/canmin.47.6.1505>.
- Lecumberri-Sanchez, P., Vieira, R., Heinrich, C.A., Pinto, F., and Wälle, M., 2017, Fluid-rock interaction is decisive for the formation of tungsten deposits. *Geology*, 45(7), pp. 579-582. <https://doi.org/10.1130/G38974.1>.
- Lehmann, B., 2021, Formation of tin ore deposits: A reassessment. *Lithos*, 402, p.105756. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105756>.
- Li, X., Deng, X.-H., Liu, W., Abulimiti, A., Chen, X., Han, S., Wu, Y., 2021. Geology, fluid inclusion and H–O–C isotope geochemistry of the Doranasai gold deposit, Chinese Altai: implications for ore genesis. *International Journal of Earth Sciences*, 111, 2741–2757. <https://doi.org/10.1007/s00531-021-02089-7>.
- Liu, X., Xiao, C., 2020. Wolframite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: Insight from thermodynamic modeling. *Ore Geology Reviews*, 117, 103289. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103289>.
- Monnier, L., Lach, P., Salvi, S., Melleton, J., Bailly, L., Béziat, D., Monnier, Y. and Gouy, S., 2018, Quartz trace-element composition by LA-ICP-MS as proxy for granite differentiation, hydrothermal episodes, and related mineralization: The Beauvoir Granite (Echassières district), France. *Lithos*, 320, pp.355-377. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.09.024>.
- Monnier, L., Salvi, S., Melleton, J., Bailly, L., Béziat, D., de Parseval, P., Gouy, S., Lach, P., 2019, Multiple generations of wolframite mineralization in the Echassieres District (Massif Central, France). *Minerals*, 9, 637. <https://doi.org/10.3390/min9100637>
- Naumov, V.B., Dorofeev, V.A., Mironova, O.F., 2011. Physicochemical parameters of the formation of hydrothermal deposits: A fluid inclusion study. I. Tin and tungsten deposits. *Geochemistry International*, 49, 1002–1021. <https://doi.org/10.1134/S0016702911100041>.
- Ni, P., Li, W.S., Pan, J.Y., Cui, J.M., Zhang, K.H., & Gao, Y., 2022, Fluid processes of wolframite-quartz vein systems: Progresses and challenges: *Minerals*, v. 12, p. 237, <https://doi.org/10.3390/min12020237>.

- Pan, J.-Y., Ni, P., Wang, R.-C., 2019. Comparison of fluid processes in coexisting wolframite and quartz from a giant vein-type tungsten deposit, South China: Insights from detailed petrography and LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. *American Mineralogist*, 104(8), 1092–1116. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6958>.
- Pereira, R.M., Neumann, R., Ávila, C.A., Castro, C., 2008, Determinação da gênese da cassiterita com base na sua composição química e inclusões minerais: ocorrências no sul e sudeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(2), 246-252. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/575>.
- Roedder, E., 1984, Volume 12: fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12, 644.
- Roedder, E., Bodnar, R.J., 1997, Capítulo 13: Estudos de inclusões fluidas de depósitos de minério hidrotermal. In: Barnes, H.L. (Ed.). *Geoquímica de Depósitos de Minérios Hidrotermais*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., p. 657-697.10
- Rudnick, R., Gao, S., 2003, "Composition of the continental crust", in: Rudnick, R.L. (Ed.), *The Crust*, in: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, vol. 3, Elsevier–Pergamon, Oxford, p. 1–64.
- Saad, A.R., Etchebehere, M.L.C., Pressinotti, P.C., Silva, R.B., Campanha, V.A., 1996, Potencialidade mineral do estado de São Paulo. *Revista Universidade de Guarulhos-Série Geociências*, 1(3), 5-17. Disponível em: <https://revistas.ung.br/index.php/geociencias/article/view/1045>
- Skvortsova, V., Mironova-Ulmane, N., Trinkler, L., Chikvaidze, G., 2013. Optical properties of natural topaz. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 49, 012051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/49/1/012051>.
- Sun, Q., 2009, The Raman OH stretching bands of liquid water. *Vibrational Spectroscopy*, 51(2), 213–217, <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2009.05.002>.
- Taylor, S.R., & McLennan, S.M. (1985). *The continental crust: its composition and evolution*. United States.
- Tischendorf, G., Gottesmann, B., Förster, H.-J., & Trumbull, R. B., 1997, On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineralogical Magazine*, 61(409), 809-834. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.409.05>
- Van Achterbergh, E., Ryan, C., Jackson, S., Griffin, W., 2001, Data reduction software for LA-ICP-MS in: *Laser-Ablation-ICPMS in the earth sciences – principles and applications*. Mineralogical Association of Canada (short course series), 29, 239-243.
- Whitney, D.L., Evans, B.W., 2010, Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1), pp.185-187.
- Wilkinson, J.J., 2001, Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55(1-4), 229-272, [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00047-5).
- Wood, S.A., Samson, I.M., 2000. The hydrothermal geochemistry of tungsten in granitoid environments: I. Relative solubilities of ferberite and scheelite as a function of T, P, pH, and mNaCl. *Economic Geology*, 95 (1), 143–182. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.1.143>.
- Yang, J.H., Kang, L.F., Liu, L., Peng, J.T., and Qi, Y.Q., 2019, Tracing the origin of ore-forming fluids in the Piaotang tungsten deposit, South China: Constraints from in-situ analyses of wolframite and individual fluid inclusion. *Ore Geology Reviews*, 111, 102939. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102939>.
- Zhang, Y., Gao, J.F., Ma, D., and Pan, J., 2018, The role of hydrothermal alteration in tungsten mineralization at the Dahutang tungsten deposit, South China. *Ore Geology Reviews*, 95, pp.1008-1027. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.006>.
- Zhang, Y.G., Frantz, J.D., 1987. Determination of the homogenisation temperatures and densities of superficial fluids in the system NaCl-KCl-CaCl₂-H₂O using synthetic fluid

inclusions. Chemical Geology, 64, 335–345.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(87)90012-X).

Anexos

Anexo 1 - tabela de dados obtidos através das análises petrográficas e microtermométricas em inclusões fluidas.

(Zhang & Frantz 1987)

Amostra	Tipo	IF	Ocorrência (G)	Te (°C)	TfG (°C)	Th (°C)	Vb/Vt (vol.%)	Densidade* (g/cm3)	Salinidade (wt.% NaCleq.)	Sistema	Campo	Perfil
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-1	Primária	-31.7	-0.2	237	30	0,814	0,354	H2O-NaCl	Campo 1	A-B
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-2	Primária	-38.7	-1.2	237	10	0,833	2,101	H2O-NaCl		A-B
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-3	Primária	-35.5	-1.0	238	8	0,828	1,764	H2O-NaCl		A-B
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-4	Primária	-36.7	-2.3	238	10	0,850	3,910	H2O-NaCl		A-B
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-5	Primária	-36.8	-2.8	238	5	0,858	4,705	H2O-NaCl		A-B
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-6	Primária	-34.1	-2.8	240	5	0,855	4,705	H2O-NaCl		A-B
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-7	Primária	-34.7	-1.2	222	10	0,855	2,101	H2O-NaCl		C-D
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-8	Primária	-36.6	-1.4	247	15	0,822	2,436	H2O-NaCl		C-D
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-9	Primária	-35.7	-1.2	213	25	0,867	2,101	H2O-NaCl		C-D
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-10	Primária	-33.5	-1.4	221	13	0,859	2,436	H2O-NaCl		C-D
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-11	Primária	-34.0	-2.1	205	10	0,889	3,587	H2O-NaCl		E-F
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-12	Primária	-35.0	-2.2	239	10	0,847	3,749	H2O-NaCl		A-B
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-13	Primária	-36.6	-1.4	223	12	0,856	2,436	H2O-NaCl		E-F
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-14	Primária	-20.0	-0.7	223	10	0,845	1,255	H2O-NaCl		E-F
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-15	Primária	-34.0	-2.1	234	22	0,853	3,587	H2O-NaCl		E-F
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-16	Primária	-35.3	-2.4	234	10	0,857	4,070	H2O-NaCl		C-D
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-17	Primária	-35.5	-2.4	242	10	0,846	4,070	H2O-NaCl		E-F
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-18	Primária	-35.8	-2.3	242	12	0,844	3,910	H2O-NaCl		C-D
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-19	Primária	-33.0	-0.1	234	13	0,817	0,170	H2O-NaCl		C-D
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-20	Primária	-30.6	-0.3	231	15	0,826	0,530	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-21	Primária	-32.8	-0.9	230	10	0,838	1,566	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-23	Primária	-34.8	-2.0	205	25	0,888	3,424	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-24	Primária	-35.2	-2.0	205	10	0,888	3,424	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-25	Primária	-34.7	-1.8	241	10	0,838	3,098	H2O-NaCl	Campo II	
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-32	Primária	-30.8	-0.6	308	25	0,680	1,052	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-33	Primária	-32.3	-0.8	231	25	0,835	1,396	H2O-NaCl	Campo III	I-J
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-34	Primária	-34.6	-1.5	233	20	0,844	2,572	H2O-NaCl		I-J
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-35	Primária	-37.3	-2	229	20	0,858	3,387	H2O-NaCl		I-J
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-36	Primária	-38.0	-1.2	232	20	0,840	2,070	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-37	Primária	-37.6	-2.6	288	25	0,776	4,339	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-38	Primária	-39.8	-2.5	324	25	0,703	4,180	H2O-NaCl		G-H
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-39	Primária	-39.8	-1.5	225	20	0,855	2,572	H2O-NaCl		G-H
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-40	Primária	-38.7	-2.3	249,5	20	0,833	3,867	H2O-NaCl		G-H
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-41	Primária	-32.2	-1.7	295	25	0,743	2,900	H2O-NaCl		G-H
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-42	Primária	-39.8	-0.3	217	20	0,847	0,500	H2O-NaCl		I-J
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-43	Primária	-39.8	-2.5	222	20	0,874	4,182	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-44	Primária	-37.4	-2	238	20	0,845	3,387	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-45	Primária	-38.4	-1.6	249	25	0,822	2,737	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-46	Primária	-37.7	-1.7	255	20	0,814	2,900	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-47	Primária	-36.2	-1.7	245	20	0,830	2,900	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-48	Primária	-39.2	-1.4	250	20	0,816	2,407	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-49	Primária	-33.3	-1.2	252	20	0,809	2,073	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PR-I-50	Primária	-39.2	-1.5	253	20	0,814	2,565	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-1	Primária	-22.8	-6.4	224		0,918	9,880	H2O-NaCl	Campo IV	
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-2	Primária	-24.5	-6.2	289		0,839	9,470	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-3	Primária	-26.5	-6.5	217		0,927	9,855	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-4	Primária	-20.6	-5.5	213,9		0,920	8,545	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-5	Primária	-24.1	-6.1	216,3		0,924	9,339	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-6	Primária	-24.3	-5	230,1		0,897	7,864	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-7	Primária	-26.1	-6.2	223,5		0,918	9,469	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-8	Primária	-24.3	-4.3	235		0,883	6,881	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-9	Primária	-27.7	-5.7	240		0,895	8,813	H2O-NaCl		K-L
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-10	Primária	-27.8	-5.6	203,5		0,931	8,680	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-11	Primária	-29.1	-5.5	229		0,904	8,545	H2O-NaCl		K-L
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-12	Primária	-28.3	-6.4	230		0,913	9,727	H2O-NaCl		K-L
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-13	Primária	-24.5	-5.4	233		0,899	8,410	H2O-NaCl		K-L
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-14	Primária	-28.8	-6.4	220		0,923	9,727	H2O-NaCl		K-L
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-15	Primária	-29.1	-6.5	241		0,903	9,855	H2O-NaCl		K-L
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-16	Primária	-24.5	-4.9	215,6		0,912	7,726	H2O-NaCl		K-L
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-17	Primária	-29.9	-7.9	221		0,936	11,570	H2O-NaCl		K-L
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-18	Primária	-27.4	-7.8	208		0,947	11,459	H2O-NaCl		K-L
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-19	Primária	-26.5	-6.5	217		0,927	9,855	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-20	Primária	-27.1	-6.9	219		0,929	10,360	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-23	Primária	-35.0	-11.2	213		0,968	15,174	H2O-NaCl	Campo V	M-N
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-24	Primária	-38.6	-7.1	227		0,923	10,609	H2O-NaCl		M-N
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-25	Primária	-25.3	-6.7	228		0,918	10,109	H2O-NaCl		M-N
IPV15D-II	Aquosa	PR-II-26	Primária	-27.7	-5.9	232		0,906	9,077	H2O-NaCl		M-N
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-1	Secundária	-26.5	-2.0	194,8		0,900	3,388	H2O-NaCl		

(cont.)

(cont.)

(Zhang & Frantz 1987)

Amostra	Tipo	IF	Ocorrência (G)	Te	TfG	Th	Vb/Vt	Densidade*	Salinidade	Sistema	Campo	Perfil
				(°C)	(°C)	(°C)	(vol.%)	(g/cm3)	(wt.% NaCleq.)			
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-2	Secundária	-23,4	-1,2	181,1		0,905	2,073	H2O-NaCl	Campo VI	
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-3	Secundária	-24,1	-0,3	141,7		0,933	0,530	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-4	Secundária	-22,2	-3,4	191,3		0,920	5,563	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-5	Secundária	-25,2	-2,5	199,1		0,901	4,182	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-6	Secundária	-24,9	-1,3	181,1		0,906	2,241	H2O-NaCl	Campo VII	
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-7	Secundária	-23,3	-0,9	154,2		0,928	1,567	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-8	Secundária	-22,1	-1,8	177,2		0,916	3,064	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-9	Secundária	-25,7	-2,6	197,2		0,905	4,339	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-10	Secundária	-26,3	-2,3	203,7		0,894	3,867	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-11	Secundária	-23,3	-2,5	210,6		0,888	4,182	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-12	Secundária	-24,1	-1,7	202,1		0,888	2,901	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	SE-I-22	Secundária	-37,0	-0,7	194	10	0,883	1,255	H2O-NaCl	Campo I	
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-1	Secundária	-27,1	-3,7	188,2		0,926	6,009	H2O-NaCl	Campo VIII	
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-2	Secundária	-24,0	-4,1	204,6		0,914	6,593	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-3	Secundária	-25,2	-6,3	210,1		0,932	9,599	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-4	Secundária	-25,1	-6,1	221,2		0,919	9,340	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-5	Secundária	-22,3	-5,2	214,2		0,917	8,139	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-6	Secundária	-24,5	-4,0	183,8		0,933	6,448	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-7	Secundária	-27,7	-4,9	194,5		0,933	7,726	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-8	Secundária	-25,9	-6,3	195,2		0,945	9,599	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-9	Secundária	-25,3	-6,6	205,3		0,939	9,983	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-10	Secundária	-26,1	-7,5	211,4		0,942	11,099	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-11	Secundária	-24,3	-6,3	192,3		0,948	9,599	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	SE-II-12	Secundária	-24,1	-6,0	209,6		0,929	9,209	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PS-I-26	Pseudo-secundária	-34,4	-1,6	242	8	0,833	2,768	H2O-NaCl	Campo II	
IPV15D-I	Aquosa	PS-I-27	Pseudo-secundária	-33,8	-1,7	213	10	0,874	2,933	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PS-I-28	Pseudo-secundária	-34,1	-1,2	226	8	0,849	2,101	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PS-I-29	Pseudo-secundária	-36,3	-1,0	245	10	0,817	1,764	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PS-I-30	Pseudo-secundária	-35,4	-2,3	236	7	0,853	3,910	H2O-NaCl		
IPV15D-I	Aquosa	PS-I-31	Pseudo-secundária	-36,1	-1,5	234	12	0,843	2,602	H2O-NaCl		
IPV15D-II	Aquosa	PS-II-21	Pseudo-secundária	-31,5	-6,4	222		0,921	9,727	H2O-NaCl	Campo V	M-N
IPV15D-II	Aquosa	PS-II-22	Pseudo-secundária	-38,0	-10,6	213		0,964	14,560	H2O-NaCl		M-N

Anexo 2 - tabela de composição química semiquantitativa do topázio das amostras IPV-15D (veio mineralizado em Sn-W e IPV-35A (topázio granito), e também da cassiterita e wolframita da amostra IPV-15D obtida por MEV-EDS.

Topázio	Ponto	F	Al2O3	SiO2	Nb2O5	SnO2	MnO	FeO	WO3	Total
IPV15D_G1_Tpz	1	20,93	51,22	27,84						100
IPV15D_G1_Tpz	2	20,9	51,43	27,67						100
IPV15D_G1_Tpz	3	20,9	51,09	28,01						100
IPV15D_G1_Tpz	4	20,85	50,87	28,28						100
IPV15D_G2_Tpz	1	21,04	50,97	27,99						100
IPV15D_G2_Tpz	2	20,58	51,39	28,04						100
IPV15D_G2_Tpz	3	20,97	51,33	27,69						100
IPV15D_G2_Tpz	4	20,79	51,23	27,99						100
IPV15D_G3_Tpz	1	20,41	51,58	28,01						100
IPV15D_G3_Tpz	2	20,72	51,44	27,83						100
IPV15D_G4_Tpz	1	20,96	51,13	27,91						100
IPV15D_G4_Tpz	2	20,55	51,24	28,21						100
IPV35A-G1-Tpz	1	20,87	51,28	27,85						100
IPV35A-G1-Tpz	2	20,4	51,55	28,05						100
IPV35A-G1-Tpz	3	20,42	51,64	27,95						100
IPV35A-G2-Tpz	1	20,38	51,42	28,2						100
IPV35A-G2-Tpz	2	20,23	51,48	28,28						100
IPV35A-G2-Tpz	3	20,33	51,49	28,18						100
IPV35A-G2-Tpz	4	20,49	51,52	28						100
IPV35A-G3-Tpz	1	20,31	51,66	28,03						100
IPV35A-G3-Tpz	2	20,64	51,01	28,35						100
Cassiterita	Ponto	F	Al2O3	SiO2	Nb2O5	SnO2	MnO	FeO	WO3	Total
IPV15D-G1_Cst	1				0	100				100
IPV15D-G1_Cst	2				0,28	99,72				100
IPV15D-G1_Cst	3				0,96	99,04				100
Wolframita	Ponto	F	Al2O3	SiO2	Nb2O5	SnO2	MnO	FeO	WO3	Total
IPV15D-G1-Wf	1						17,63	7,5	74,86	100
IPV15D-G1-Wf	2						17,41	7	75,58	100