



A RELAÇÃO ENTRE GRANITOS E A OCORRÊNCIA DE COBRE NO PLÚTON ÁGUAS BELAS, DOMÍNIO PEAL, PROVÍNCIA BORBOREMA: *FOOTPRINTS* DE UM SISTEMA MINERAL DO TIPO *INTRUSION-RELATED*?

THE RELATIONSHIP BETWEEN GRANITES AND COPPER OCCURRENCE IN THE ÁGUAS BELAS PLUTON, PEAL DOMAIN, BORBOREMA PROVINCE: FOOTPRINTS OF AN INTRUSION-RELATED MINERAL SYSTEM?

Sebastião Rodrigo Cortez de Souza ^{1*}, Daniel Delduque de Noronha ¹, Hassan Hosseini Khah ¹, João Vitor Barbosa Rubim Neves ¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Departamento de Geologia – DGEO, Laboratório de Estudos Metalogenéticos Aplicados - LEMA. Av. Arquitetura s/n, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, 50.740-550, Brasil. *autor correspondente. e-mail: rodrigo.cortez@ufpe.br.

<https://doi.org/10.51359/1980-8208.2025.268918>

RESUMO

A área de estudo está localizada a nordeste da cidade de Águas Belas/PE, inserida no Terreno PEAL da Província Borborema. É caracterizado por uma ocorrência de minerais de cobre (principalmente malaquita) sobre rochas ígneas de granulação média a grossa, como sienitos, quartzo-sienitos e sienogranitos, compostas por K-feldspato (ortoclásio/microclina), plagioclásio, quartzo, titanita, rutilo, magnetita e biotita. Dados obtidos na literatura classificam essas rochas como metaluminosas a levemente peraluminosas, pós-colisional e calcialcalina de alto-K a alcalina, com características geoquímicas de elementos traços mostrando alto Ba, médio Sr, baixo Rb e HFSE, ϵ_{Nd} negativo e T_{DM} de idade paleoproterozoica, indicando fonte com mistura de componentes mantélicos e crustais. Essas rochas formam o plúton Águas Belas e foram submetidas a processos metassomáticos que levou à formação de vênulas e *stockworks*, com a geração de uma nova paragênese mineral hidrotermal característica. O estudo petrográfico focou em vênulas (de variadas composições) subcentimétricas e seus halos de alteração centimétricos. As alterações hidrotermais descritas foram propilitização, silicificação, potassificação, sericitização e sulfetação. Essas alterações corroboram o estabelecimento de um sistema metassomático, com mineralogia compatível com temperaturas médias a baixas (350°C - 200°C) e ambiente de pH neutro a levemente ácido (4-7). A presença de calcopirita (mineral primário de cobre) e pirita nas vênulas e halos de alteração sugerem que o cobre foi carreado e precipitado pelo fluido hidrotermal. A análise litogeoquímica

Recebido em 20/11/2025. Aprovado em 09/12/2025.



Direitos autorais das pessoas autoras, 2025. Licenciado sob [Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

comparou rochas inalteradas da literatura e rochas com matrizes alteradas e vênulas hidrotermalizadas. Diagramas binários (do tipo Harker) e análise estatística de Cluster indicaram a mobilidade de alguns elementos químicos durante a alteração hidrotermal, com empobrecimento em Si, Ti, Al e enriquecimento em Fe, Mn, Mg, Ca, K, P. A análise de componentes principais (PCA) corroborou a mobilidade, com a atividade hidrotermal (PC2) mostrando correlação positiva em Ca-Mn-Mg-K-Fe-P. O contexto geológico-geoquímico-metalogenético da ocorrência de cobre do plúton Águas Belas, Terreno PEAL da Província Borborema, é interpretado como similar aos sistemas minerais do tipo *Intrusion-Related*, associados a fluidos magmático-hidrotermais.

Palavras-chave: depósito *intrusion-related*; cobre; alteração hidrotermal; província Borborema.

ABSTRACT

The study area is located northeast of the city of Águas Belas/PE, within the PEAL Terrain of the Borborema Province. It is characterized by an occurrence of copper minerals (mainly malachite) on medium- to coarse-grained igneous rocks, such as syenites, quartz-syenites, and syenogranites, composed of K-feldspar (orthoclase/microcline), plagioclase, quartz, titanite, rutile, magnetite, and biotite. Data obtained from the literature classify these rocks as metaluminous to slightly peraluminous, post-collisional, and calc-alkaline, with high-K to alkaline trace element geochemical characteristics showing high Ba, medium Sr, low Rb and HFSE, negative ϵNd , and Paleoproterozoic age TDM, indicating a source with a mixture of mantle and crustal components. These rocks form the Águas Belas pluton and have undergone metasomatic processes that led to the formation of veinlets and stockworks, generating a new characteristic hydrothermal mineral paragenesis. The petrographic study focused on subcentimeter veinlets (of varying compositions) and their centimeter alteration halos. The hydrothermal alterations described were propylitization, silicification, potassicization, sericitization, and sulfidation. These alterations corroborate the establishment of a metasomatic system, with mineralogy compatible with medium to low temperatures (350°C - 200°C) and a neutral to slightly acidic pH environment (4-7). The presence of chalcopyrite (primary copper mineral) and pyrite in the veinlets and alteration halos suggests that copper was carried and precipitated by the hydrothermal fluid. The lithogeochemical analysis compared unaltered rocks from the literature with rocks containing altered matrices and hydrothermally altered veinlets. Binary diagrams (Harker type) and statistical cluster analysis indicated the mobility of some chemical elements during hydrothermal alteration, with depletion in Si, Ti, and Al and enrichment in Fe, Mn, Mg, Ca, K, and P. Principal component analysis (PCA) corroborated the mobility, with hydrothermal activity (PC2) showing a positive correlation in Ca-Mn-Mg-K-Fe-P. The geological-geochemical-metallogenic context of the copper occurrence in the Águas Belas pluton, PEAL Terrain of the Borborema Province, is interpreted as similar to Intrusion-Related mineral systems associated with magmatic-hydrothermal fluids.

Keywords: intrusion-related deposit; copper; hydrothermal alteration; Borborema province.

1. INTRODUÇÃO

O estudo e compreensão da granitogênese é fundamental para compreender a evolução geodinâmica de

qualquer província geotectônica e elucidar os eventos geológicos atuantes. Neste cenário, o magmatismo granítico representa um registro crucial dos processos de subducção, colisão, amalgamação e pós-colisão que levaram

Estudos Geológicos: Recife-PE, Brasil, v. 35, n. 2, p. 1-20, 2025. Universidade Federal de Pernambuco.

ISSN 1980-8208. DOI: <https://doi.org/10.51359/1980-8208.2025.268918>.



Este artigo está sob uma [Licença Creative Commons 4.0 Internacional - CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ao quadro geodinâmico conhecido atualmente (e.g. Santos et al, 2022). Ao mesmo tempo, as rochas graníticas, por sua natureza e processos de formação, estão intrinsecamente ligados à geração de uma vasta gama de depósitos minerais. Essa conexão se dá através de múltiplos mecanismos, que envolvem a diferenciação magmática, a liberação de fluidos hidrotermais e a interação com as rochas encaixantes (Robb, 2005).

A Província Borborema - PB, no nordeste do Brasil, é uma região geologicamente complexa e de grande importância para o estudo de rochas graníticas diversas. A área foi palco de intensa atividade magmática e tectônica durante o Ciclo Brasileiro-Pan-Africano (aproximadamente entre 580 e 490 milhões de anos atrás), resultando na intrusão de uma vasta quantidade de corpos ígneos (Brito Neves et al., 2000; Caxito et al., 2020; Neves, 2021). O Domínio Pernambuco-Alagoas, especificamente, se notabiliza como sendo a região com a maior ocorrência de batólitos graníticos em toda a PB (Ferreira et al., 2021; Silva Filho et al, 2016; Van Schmus et al., 2008).

Pirajno (2009), classifica os depósitos minerais com base nos sistemas geológicos que os geram. Os depósitos associados às rochas magmáticas, ou que são impulsionados pelo calor e/ou fluidos magmáticos, são agrupados em categorias amplas, abrangendo tanto os depósitos formados diretamente do magma, quanto formados a partir de fluidos derivados do magma. Em relação aos depósitos minerais associados à granitogênese, destacam-se: i) sistemas pegmatíticos e ii) sistemas magmático-hidrotermais (depósitos do tipo Pórfiro, Skarn, *Intrusion-Related Deposit* (IRD), Epitermal e Greisen).

A despeito da extensa granitogênese da PB e da sua potencialidade metalogenética associada, poucas ocorrências minerais são

conhecidas e/ou devidamente estudadas. Depósitos minerais relacionados a sistemas pegmatíticos (ricos em Li, Be, Ta, Nb, Sn, minerais industriais (quartzo, feldspato, mica) e gemas) e skarns (W, Cu, Bi, Te, Au, Pb, Zn), são bem documentos no Domínio setentrional da PB (Souza Neto et al., 2008). Todavia, não encontramos na literatura especializada da PB, trabalhos científicos focados em mineralizações do tipo *Intrusion-Related Deposit* (W, Sn, Cu, Au, Ag, Bi, As, Mo, Te, Sb), Pórfiro (Cu, Mo, Au), Epitermal (Au, Ag, Cu, Pb, Zn) ou Greisen (Sn, W, Li, Be, Nb, Ta, F).

O presente trabalho tem como objetivo principal investigar uma ocorrência de cobre na região de Águas Belas, Pernambuco, com foco particular no desenvolvimento de uma paragênese hidrotermal e a sua associação geológica com rochas graníticas. Através da análise petrográfica e geoquímica, buscar caracterizar a natureza da mineralização de cobre, determinar os mecanismos de sua gênese e compreender a relação genética e espacial entre o minério, o hidrotermalismo e a intrusão granítica hospedeira, visando contribuir para o conhecimento dos potenciais metalogenéticos da Província Borborema.

2. METODOLOGIA

Trabalho de campo com duração de 3 dias, com o objetivo de realizar reconhecimento da geologia e metalogênese da área, bem como a coleta de amostras de rocha para estudo petrográfico e análise geoquímica.

Os estudos petrográficos foram realizados em 8 lâminas delgadas/polidas, produzidas no Laboratório de Laminação do DGEO-UFPE. As descrições petrográficas foram realizadas à luz transmitida e refletida no microscópio *Olympus BX-40*, no Laboratório de Estudos Metalogenéticos Aplicados (LEMA) do DGEO-UFPE. As fotomicrografias foram obtidas com auxílio

do software *ImageView*, do laboratório acima.

Foram realizadas análises geoquímicas em oito amostras através do método de Fluorescência de Raios-X Portátil (FRX-p), da marca *Thermo Scientific Niton™ XLET GOLDD+ XRH Analyzer*, no Laboratório de Geoquímica Aplicada ao Petróleo e Energia (LGAPE), do Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (i-LITPEG-UFPE). Este equipamento analisa até 30 elementos de Mg a U. O tempo de permanência da amostra no equipamento foi em torno de 90s, com resultados com intervalo de confiança de 2σ . Adicionalmente, utilizamos dados geoquímicas de 4 amostras compiladas da pesquisa de Silva Filho et al. (2010), obtidas por aqueles autores pela metodologia ICP-AES, no laboratório comercial ACME.

Os dados numéricos foram tratados nos softwares *Microsoft Excel 2019* e *Past Stat 5.2*, enquanto mapas e gráficos foram gerados no software *Inkscape*.

3. DADOS GEOLÓGICOS

3.1. Geologia Regional

A área deste trabalho localiza-se na Província Borborema - PB (Almeida et al., 1981), que representa um segmento crustal de uma faixa fortemente afetada pela orogênese Brasileira. Sua localização é delimitada ao norte com o Domínio da Zona Transversal, ao sul com o sistema do Domínio Sergipano, e a oeste e leste sendo recoberto pelos sedimentos terrígenos fanerozoicos da Bacia de Jatobá e Bacia Costeira, respectivamente.

O Domínio PEAL possui um contexto geológico complexo, sendo construído sobre um embasamento paleoproterozoico e coberto por sequências supracrustais e extensos granitoides neoproterozoicos (Figura 1).

O embasamento é formado pelas rochas paleoproterozoicas do Complexo Belém do São Francisco, constituído por ortognaisses migmatizados, variando de graníticos a tonalítico-granodioríticos, frequentemente contendo enclaves máficos de composição quartzo-diorítica. Datações U–Pb em zircão (Silva Filho et al., 2002; Neves, 2015) indicam idades de cristalização do protólito por volta de 2,079 Ga. Sobreposto, ocorrem rochas supracrustal neoproterozoicas do Complexo Cabrobó, que são caracterizadas por rochas de origem sedimentar e vulcanossedimentar, submetidas a metamorfismo de alto grau e migmatização, incluindo xistos, paragneisses, metagrauvacas, quartzitos, rochas calcissilicáticas e mármore (Silva Filho et al., 2014). Finalmente, o PEAL é marcado pela intensa intrusão de granitoides neoproterozoicos brasileiros, que variam de sin- a tardi-tectônicos e exibem afinidades geoquímicas distintas (alto-K cálcio-alcálica, shoshonítica, alcalina, peraluminosa). Dentre os principais corpos ígneos, destaca-se o batólito Águas Belas–Canindé, localizado na porção centro-sul do PEAL, formado por sienitos, dioritos a granodioritos porfiríticos e, majoritariamente, sienogranitos, ambos portadores de enclaves máficos (Ferreira et al., 2021; Silva Filho et al., 2002, 2014, 2016).

A área foi afetada por uma deformação compressional evidenciada pela ocorrência de uma foliação de baixo ângulo e um enxame de pequenas intrusões graníticas controladas por uma deformação transpressiva (Brito Neves et al. 1995; Santos et al. 2010). As idades U–Pb dos granitoides variam predominantemente entre 635 Ma e 573 Ma (Neoproterozoico/Ediacarano), com picos em torno de 590 Ma e um grupo mais antigo que 600 Ma. Idades Modelo Sm–Nd (TDM) variam de 0,9 Ga a 2,8 Ga, indicando uma significativa participação

de crosta paleoproterozoica na formação dos magmas (Silva Filho et al., 2014).

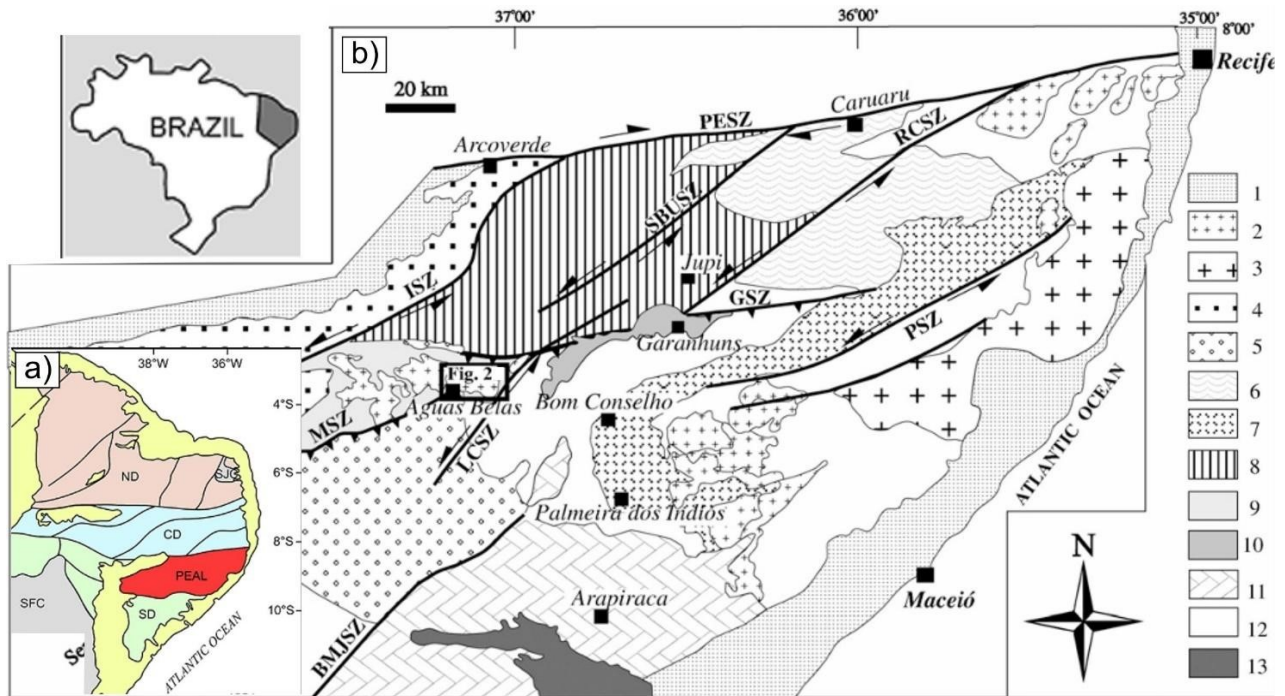


Figura 1. a) Mapa simplificado dos domínios geotectônicos da Província Borborema: ND - Domínio Setentrional; CD - Domínio da Zona Central/Transversal; PEAL - Domínio Pernambuco-Alagoas; SD - Domínio Sergipano. b) Mapa geológico simplificado do Domínio PEAL, evidenciando a localização da área estudada (em detalhes na Fig. 2). 1 - Cobertura sedimentar paleozóica; 2 - Granitóides Brasileiros; 3 - Batólito Ipojuca-Atalaia; 4 - Batólito Buique-Paulo Afonso; 5 - Batólito Águas Belas-Canindé; 6 - Batólito de Garanhuns; 7 - Sequência dos Palmares; 8 - Sequência Venturosa; 9 - Quartzitos Garanhuns; 10 - Sequência Inhapi; 11 - Subfaixa Alagoana; 12 - Complexo Belém do São Francisco; 13 - Bloco Arqueano. Zonas de cisalhamento: PESZ - Pernambuco; RCSZ - Rio da Chata; PSZ - Palmares; LCSZ - Limitão-Caetés; ISZ - Itaíba; SBUSZ - São Bento do Una; GSZ - Garanhuns; MSZ - Maravilha. Fonte: Modificado de Ferreira et al. (2021) e Silva Filho et al. (2010).

3.2. Plúton Águas Belas

De acordo com Silva Filho et al. (2010), o plúton Águas Belas é composto por sienogranitos com biotita e anfibólio e sienogranitos com piroxênio (Figura 2), que intrudem metatexitos e diatexitos de composição tonalítica, com os metatexitos gradando para diatexitos da margem para o centro da porção oeste do batólito. O plúton Águas Belas é parte integrante do batólito Águas Belas, e afora na sua porção NE com dimensões aproximadas

de 15 km por 5 km, alongado na direção E-W.

Petrograficamente, são rochas homogêneas, com texturas que variam de equigranular (granulação média a grossa) a porfirítica (com grandes fenocristais de feldspato potássico, de 1 a 5 cm). São ricos em feldspato potássico, quartzo e pouco plagioclásio, além de biotita e anfibólio (hornblenda/edenita) comuns, além de titanita, epidoto, zircão e apatita como acessórios. Enclaves microgranulares máficos ou anfibolíticos são comumente encontrados.

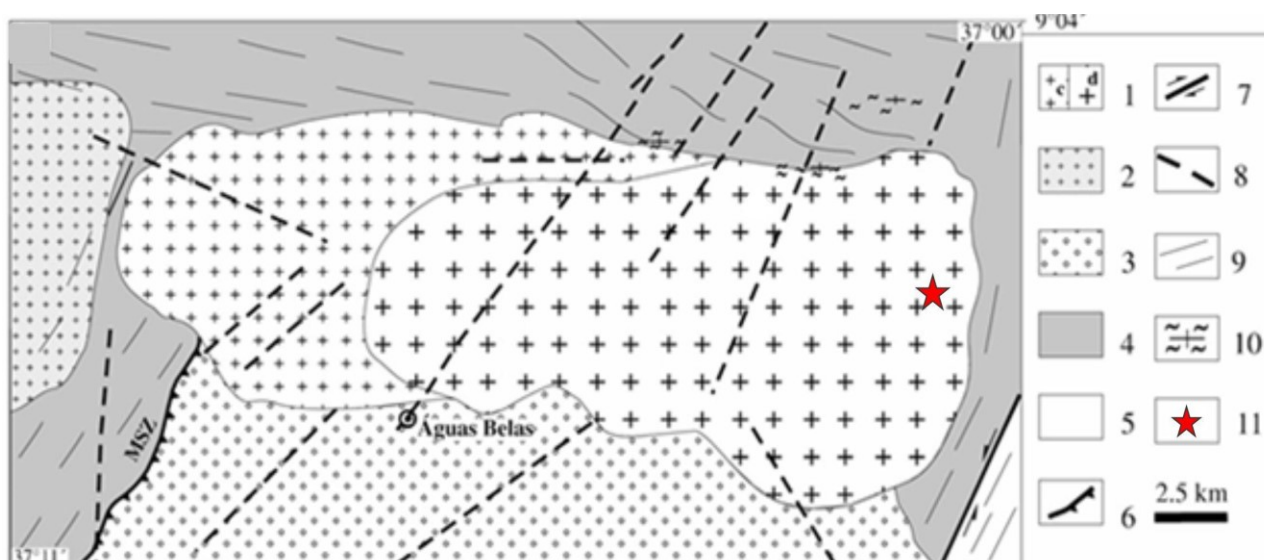


Figura 2. b) Mapa geológico simplificado da área de estudo. 1 - O plúton Águas Belas (c: piroxênio-sienogranito, d: anfibólio-biotita-sienogranito); 2 - Granitos Serrote dos Macacos (580 Ma); 3 - Batólito Águas Belas-Canindé; 4 - Metassedimentos da Sequência Inhapi; 5 - Complexo Belém do São Francisco; 6 - Zona de cisalhamento transpressiva Maravilha; 7 - Zona de cisalhamento transcorrente Limitão-Caetés; 8 - Fraturas; 9 - Lineamentos foto-estruturais; 10 - Foliação Milonítica; 11 - Localização da ocorrência de cobre visitada. Fonte: Modificado de Silva Filho et al. (2010).

3.3. Geologia Local da Ocorrência de Cobre

A ocorrência de cobre, objetivo deste trabalho, está localizada na borda nordeste da Serra das Guaribas, em uma área de forte declividade e difícil acesso. A serra atinge sua elevação máxima em 948 metros, enquanto o local específico da ocorrência tem uma cota topográfica de aproximadamente 600 metros de altitude. Originalmente, esta área foi explorada no passado com o objetivo de aproveitamento dos blocos para rocha ornamental. Durante essa fase, uma escavação piloto foi realizada. O intuito dessa escavação era decapar o manto intempérico/coluvionar para expor a rocha

inalterada e estudar a sua viabilidade econômica.

Na cava é possível notar variações de rochas plutônicas ácidas, intensamente fraturadas e alongadas segundo a direção E-W (Figura 3a). Essas variações litológicas incluem sienitos, quartzo-sienitos e sienogranitos leucocráticos, de granulação fina a média, levemente magnéticos e com coloração rósea a rósea-avermelhada. Nos planos de fraturas expostos ao longo da cava, a ocorrência de malaquita e azurita, acompanhado pela característica deposição laminar de coloração verde a verde-azulada, fica evidente (Figura 3b). Zonas de falha e/ou de intenso fraturamento costumam ser enriquecidas em hidróxidos de ferro (Figura 3c).

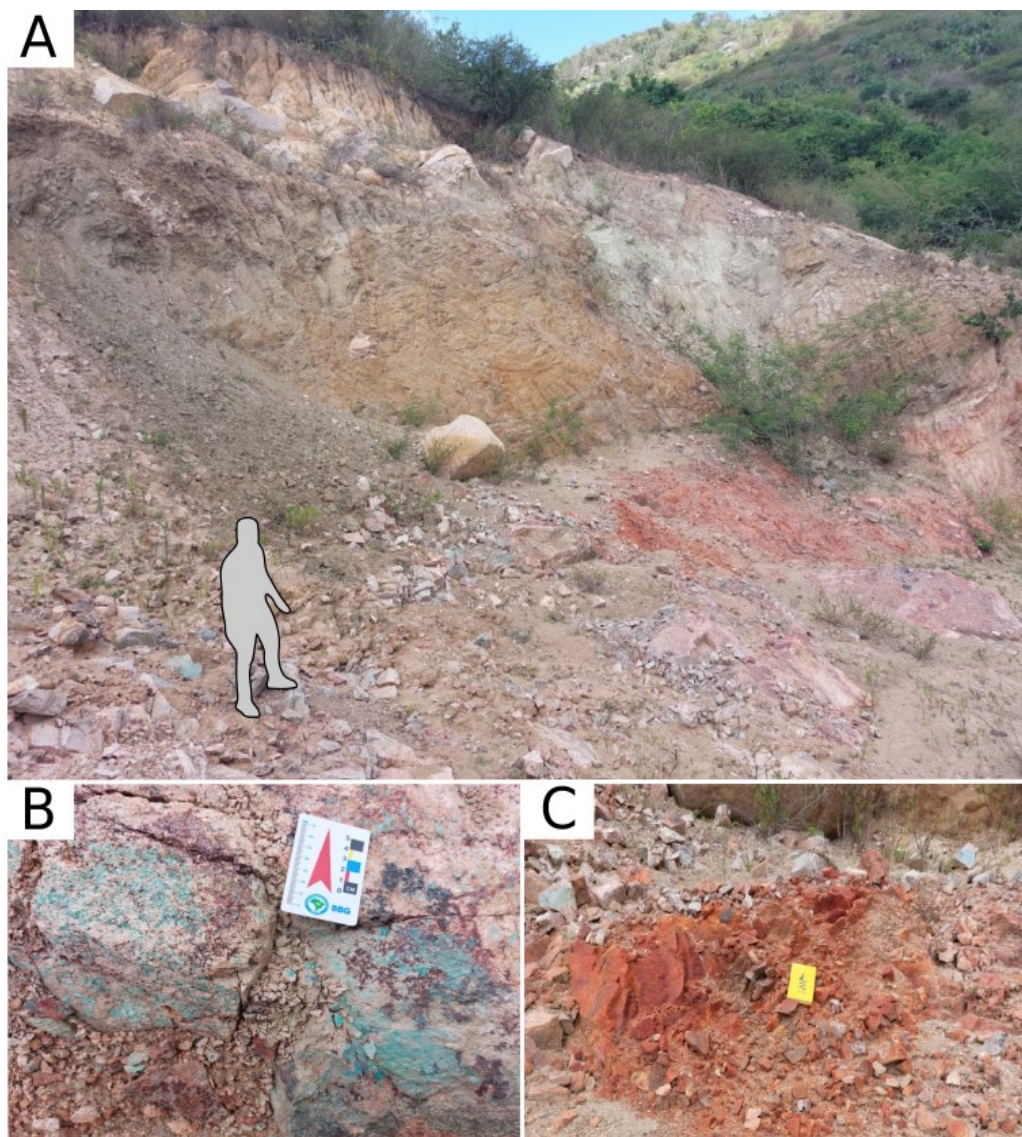


Figura 3. A) Panorama geral da cava com a ocorrência de cobre da Serra das Guaribas. B) Malaquita e azurita em forma de película sobre o plano de fratura no sienito. C) Zona com intensa oxidação e precipitação de hidróxidos de ferro, evidenciando intenso fraturamento. Fonte: Autores (2025).

De forma geral, a área é dominada por uma intensa presença de vênulas preenchendo fraturas, que recortam todas as rochas plutônicas da área. Tais vênulas podem ocorrer isoladamente (Figura 4a) com espessura geralmente inferiores a 10 mm, ou criando um sistema denso e interconectado de vênulas (em forma de rede), formando o padrão do tipo stockwork (Figura 4b-d). Esse tipo de textura é característico de depósitos volumosos de baixa a médios teores de

cobre ou ouro. As vênulas são feições geológicas que representam a precipitação de minerais a partir de fluidos hidrotermais que circulam através de espaços abertos das fraturas e fissuras na rocha hospedeira. As vênulas são comumente preenchidas por sílica-epidoto-sericita-clorita, além de óxidos/hidróxidos de ferro-sulfetos (Figura 4e) e carbonatos (malaquita/azurita) (Figura 4f) de forma subordinada.

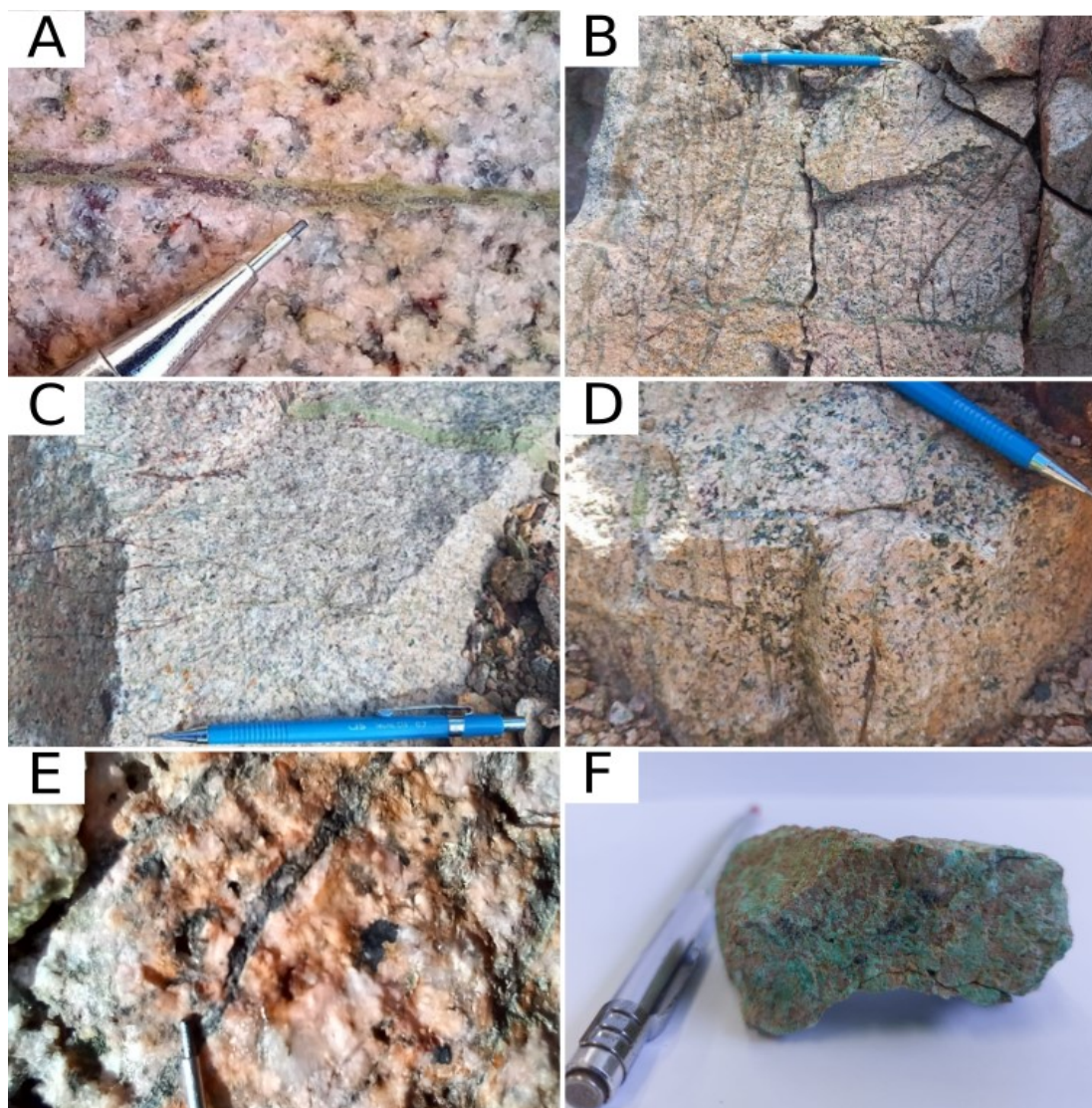


Figura 4. A-D) Diferentes tipos de venulações, de simples a formando padrões do tipo *stockwork*, preenchendo fraturas em variados litotipos do plúton Águas Belas. E) vênula preenchida por óxidos/hidróxidos de ferro e sulfetos, de granulação muito fina a afanítica. F) Detalhe de uma amostra representativa de um plano de fratura preenchida por malaquita/azurita. Fonte: Autores (2025).

4. RESULTADOS

4.1. Petrografia das Rochas Inalteradas

Foram descritos sienitos, quartzo-sienitos e sienogranitos que apresentam mineralogia semelhante entre si, diferindo essencialmente no seu conteúdo modal (Figura 5). Neste caso, o magmatismo

gerou rochas faneríticas, inequigranulares seriadas e de textura granular alotriomórfica, localmente porfirítica. Petrograficamente, os litotipos são compostos por K-feldspato (ortoclásio), microclina, plagioclásio, quartzo, titanita, rutilo, magnetita e biotita, além de saussurita como produto de desestabilização dos feldspatos (Figura 6).



Figura 5. Classificação modal das rochas estudadas, segundo o diagrama QAP de Streckeisen (1976). Fonte: Autores (2025).

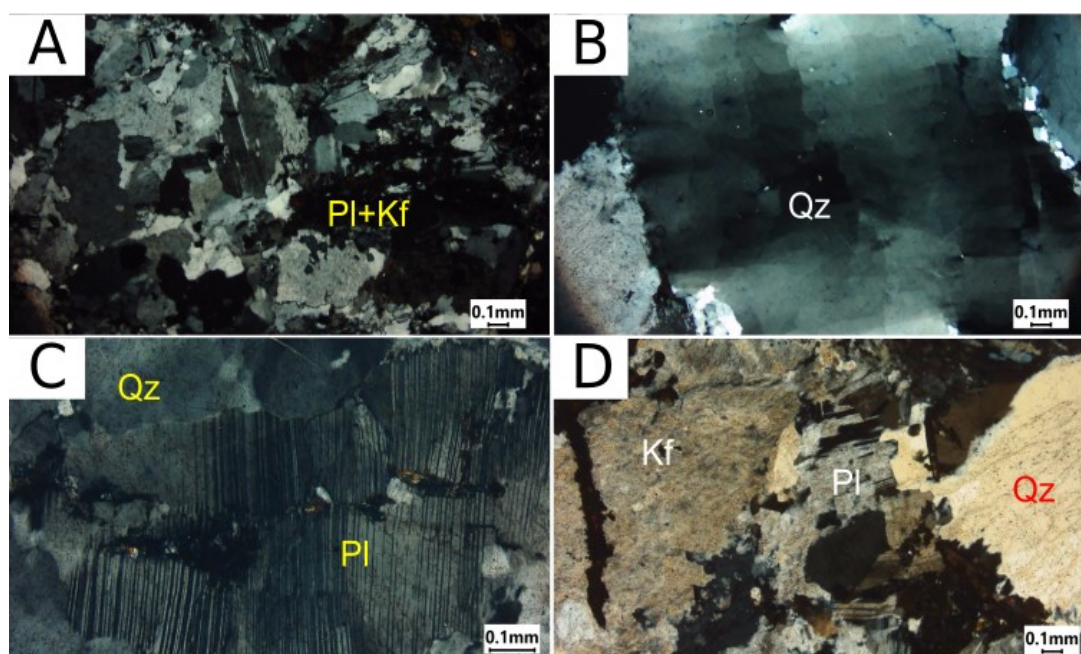


Figura 6. Fotomicrografias à nicol cruzado das rochas sieníticas que compõem o plúton Águas Belas. Pl- plagioclásio; Kf- K-feldspato; Qz-quartzo. Fonte: Autores (2025).

4.2. Petrografia de Rochas Alteradas Hidrotermalmente

O estudo petrográfico de rochas alteradas hidrotermalmente permite a identificação e caracterização em lâmina delgada dos processos metassomáticos que levaram à formação de uma nova paragênese mineral hidrotermal, distinta da paragênese magmática presente na formação das rochas que compõem o plúton Águas Belas. Para tal, foram

selecionadas amostras com vênulas (subcentimétricas) e halos de alteração (centimétricas) entre a vênula e a matriz granítica.

As alterações hidrotermais mais facilmente reconhecíveis nas vênulas são propilitização e silicificação, enquanto potassificação e sulfetação ocorrem apenas de forma localizada. A propilitização é uma alteração tipicamente de temperatura média a baixa e pH próximo ao neutro, e se caracterizada pela

neoformação de minerais máficos, principalmente epidoto (Figura 7K-L) e clorita (Figura 7G-J), que substituem minerais primários como anfibólios e biotitas. Petrograficamente, a propilitização confere à vênula uma tonalidade verde escura e, em muitos casos, forma um halo externo centimétrico na rocha hospedeira. A potassificação, que se manifesta primeiramente na desestabilização dos feldspatos através do processo de saussuritização do entorno das vênulas, e mais frequente na

forma de sericitização, que é visualizada pela substituição do plagioclásio e, menos frequentemente, do feldspato potássico, por sericita (Figura 7A-F). Esta alteração é tipicamente de temperatura média e pH ácido. A silicificação (Figura 7K-L) é petrograficamente identificada pela introdução de quartzo (sílica) que preenche espaços intersticiais nas vênulas e fraturas, muito pontualmente substituindo pervasivamente os cristais de quartzo primários da rocha, formando quartzo neoformado, microcristalino.

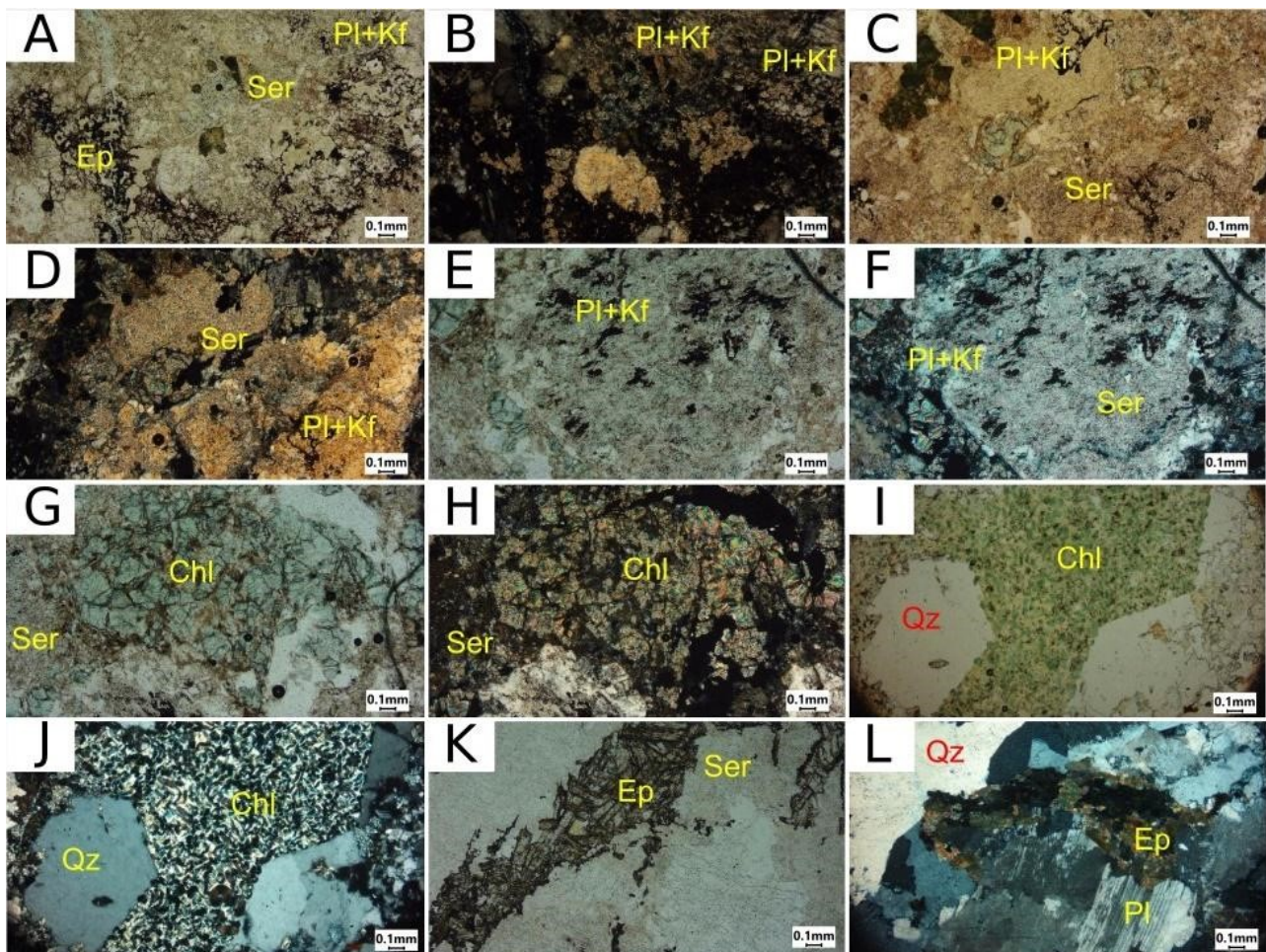


Figura 7. Fotomicrografias das alterações hidrotermais sob luz transmitida e nicól paralelo (A-C-E-G-I-K) e à nicól cruzado (B-D-F-H-J-L). A-F Sericitização pervasiva sobre os feldspatos. G-J Cloritização. K-L Epidotização e silicificação venulares. Pl - plagioclásio; Kf - K-feldspato; Sct - sericita; Chl - clorita; Qz - quartzo; Ep - Epidoto. Fonte: Autores (2025).

A sulfetação refere-se à introdução de minerais de sulfeto (principalmente pirita e calcopirita, Figura 8D-E) que, em lâminas polidas, são observados como cristais disseminados nas vênulas e,

raramente, na zona de alteração do halo entre a vênula e a matriz. A sua ocorrência volumétrica é bastante limitada, dispersa e sem um controle de zonação característico. Eventos supergênicos,

ligados a processo de intemperismo marcam a última fase de alteração reconhecida neste estudo. Esta fase é importante pois imprime as cores características que chamam a atenção

nos afloramentos, principalmente nos planos de fraturas: verde representando a precipitação de malaquita (localmente azurita) (Figura 8A-C) e vermelho representando a precipitação de goethita.

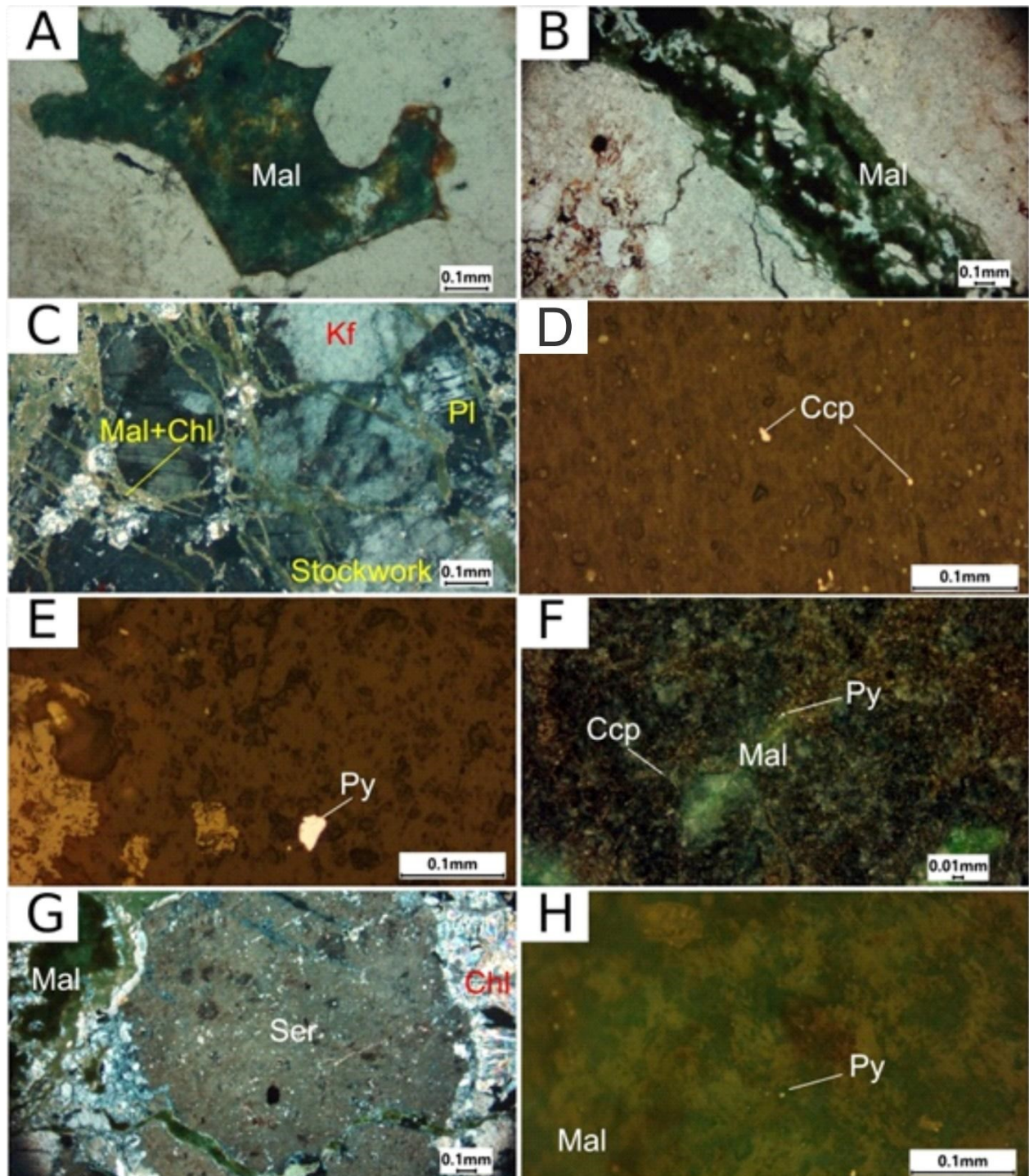


Figura 8. Fotomicrografias dos minerais sulfetados e supergênicos, luz transmitida e refletida. A-C) A malaquita é verde e se forma a partir de pseudomorfo de sulfetos, feldspatos, em vênulas e *stockwork*. D-E) Relictos de sulfetos primários, calcopirita e pirita, disseminados. F-H) Geração de malaquita a partir de calcopirita e pirita, sendo estes apontados como fonte do cobre para o processo supergênico, que ocorre tardiamente em relação à sericitização e cloritização. Fonte: Autores (2025).

Estudos Geológicos: Recife-PE, Brasil, v. 35, n. 2, p. 1-20, 2025. Universidade Federal de Pernambuco.

ISSN 1980-8208. DOI: <https://doi.org/10.51359/1980-8208.2025.268918>.

 Este artigo está sob uma [Licença Creative Commons 4.0 Internacional - CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

4.3. Geoquímica

Um estudo geoquímico foi realizado visando obter uma compreensão quantitativa e precisa sobre a litogeoquímica das rochas ígneas e a sua diferenciação das rochas hidrotermalizadas. Para tal, foram realizadas oito análises geoquímicas por FRXp, quatro delas representando as vênulas hidrotermalizadas (amostras CAB10B-V, CAB9-V, CAB11-V e CAB6-V) e quatro representando as rochas

hospedeiras hidrotermalizadas (amostras CAB10A-M, CAB9-M, CAB11-M e CAB6-M). Como representantes das rochas sem alteração hidrotermal, foram compilados os dados das amostras AB-08, AB-10, AB-13 e AB-17, analisadas por Silva Filho et al. (2010) pelo método ICP-AES. Os resultados analíticos obtidos estão disponibilizados na Tabela 01. Os estudos litogeoquímicos foram baseados apenas nos elementos maiores e menores. As análises de Na₂O não são obtidos pela técnica da FRXp.

Tabela 1. Resultados analíticos representativos da geoquímica dos sienogranitos sem alteração, dos sienogranitos com matriz alterada e vênulas com alteração hidrotermal. Resultados expressos em porcentagem (%). N.A. – não analisado. Fonte: Compilado de Silva Filho et al. (2010) e Autores (2025).

Rocha	Sienogranitos s/ Alteração				Sienogranitos c/ Matriz Alterada				Vênulas c/ Alteração			
Amostra	AB-08	AB-10	AB-13	AB-17	CAB 10A-M	CAB 9-M	CAB 11-M	CAB 6-M	CAB 10B-V	CAB 9-V	CAB 11-V	CAB 6-V
SiO ₂	69,14	70,40	70,64	72,39	55,84	57,17	53,14	54,20	59,11	66,10	58,41	60,86
TiO ₂	0,25	0,18	0,18	0,13	0,04	0,03	0,14	0,04	0,02	0,07	0,05	0,07
Al ₂ O ₃	14,39	15,00	14,50	14,23	14,69	18,86	12,06	13,71	9,01	9,84	8,87	11,81
Fe ₂ O ₃	2,99	2,24	2,28	1,77	7,19	4,84	8,04	5,90	10,13	6,34	9,63	9,82
MnO	0,07	0,05	0,06	0,05	0,08	0,02	0,95	0,03	0,70	0,45	0,02	0,22
MgO	0,42	0,32	0,34	0,27	0,49	0,49	0,65	0,49	1,15	1,09	0,89	0,80
CaO	1,15	0,67	0,96	0,85	0,83	1,31	1,00	0,52	4,63	2,31	2,74	2,46
Na ₂ O	3,55	3,53	3,78	4,20	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
K ₂ O	6,92	6,20	6,47	5,25	7,20	7,35	7,31	7,46	9,25	10,20	9,80	9,66
P ₂ O ₅	0,07	0,06	0,08	0,05	1,15	0,38	0,96	2,93	0,83	0,50	0,36	0,60
TOTAL	98,95	98,65	99,29	99,19	87,50	90,44	84,25	85,28	94,83	96,89	90,76	96,30

5. DISCUSSÃO

5.1. Dados Petrográficos

A análise petrográfica confirmou o desenvolvimento de minerais de uma paragênese hidrotermal cristalizados ao longo das vênulas, em alguns casos, gerando halos de alterações centimétricos entre as vênulas e a matriz da rocha sienogranítica hospedeira. A presença de calcopirita (mineral cuprífero) e pirita (mineral que pode conter pequenos teores de cobre como oligoelemento) nas vênulas e no halo de alteração, indicam que o metal cobre pode ter sido carregado e precipitado a partir de uma solução hidrotermal.

O desenvolvimento de uma mineralogia típica de produtos de alteração, tipo propilitização (epidoto-clorita), potassificação (sericita), sulfetação (pirita-calcopirita) e silicificação corroboram com o estabelecimento de um sistema metassomático. A mineralogia gerada é compatível, em resumo, com temperaturas médias a baixas (350°C - 200°C), formadas em um ambiente de pH neutro a levemente ácido (4-7), fluidos aquosos e moderada a alta fO₂. A inexistência de carbonatos na fase hidrotermal aponta para a baixa saturação de CO₂ no fluido mineralizador, ao passo que a presença de carbonato na fase supergênica, indica a participação de CO₂ atmosférico/superficial presente no fluido

aquoso relacionado ao intemperismo tardio.

A Figura 9 sintetiza e apresenta a sequência paragenética e os principais

minerais das fases magmática, hidrotermal e supergênica descritos neste trabalho.

Minerais	Fase Magmática	Fase Hidrotermal	Fase Supergênica
Quartzo			
K-feldspato			
Microclina			
Plagioclásio			
Saussurita			
Sericita			
Clorita			
Biotita			
Epidoto			
Titanita			
Rutilo			
Magnetita			
Hematita			
Pirita			
Calcopirita			
Malaquita			
Goethita			

Figura 9: Sequência paragenética, obtida através de estudo petrográfico de luz transmitida e refletida, apontando a formação de determinados minerais relacionados à sua respectiva fase geológica de formação. Fonte: Autores (2025).

5.2. Dados Geoquímicos

De acordo com o postulado por Silva Filho et al. (2010), o plúton Águas Belas pode ser caracterizado geoquimicamente como rochas graníticas (I.s.) metaluminosos a levemente peraluminosos, próximos ao campo peralcalino, que apresentam distinta geoquímica de elementos traços, com Ba muito alto (1300-6155 ppm), Sr médio (430-690 ppm), Rb baixo a médio (203-258 ppm) e HFSE relativamente baixos (Nb = 8-14 ppm; Ta = 0,2-2,0 ppm; Zr = 81-189 ppm), além de discretas anomalias negativas de Eu (0,86-,98). O magmatismo é classificado como pós-colisional, transicional e calcialcalino de alto-K e alcalino. Isotopicamente, apresenta εNd (600 Ma) negativo (≈ -12,4), com idade modelo (T_{DM})

paleoproterozoica (~2130 Ma) e isótopos de oxigênio δ¹⁸O, obtidos em zircão, variando de 6,3‰ a 10,3‰, sugerindo mistura de componentes mantélicos e crustais

Diagramas binários do tipo Harker são amplamente utilizados na litogeoquímica para visualizar e interpretar a diferenciação magmática de uma série de rochas ígneas geneticamente relacionadas. A Figura 10 mostra a dispersão de SiO₂ versus os demais elementos maiores e menores, indicando agrupamentos e correlações características entre seus constituintes químicos. A quantidade de sílica sempre é maior nas rochas inalteradas do que nas rochas com alteração hidrotermal e vênulas, a despeito do teor de quartzo modal indicar o contrário. A concentração

de Ca e K é maior nas vênulas e praticamente idêntica entre a matriz alterada e a inalterada, provavelmente refletindo a intensa alteração para epidoto (propilitização) nas vênulas. Teores de manganês e fósforo são mais elevados

nos produtos hidrotermais, assim como ferro, provavelmente refletindo o caráter de alta mobilidade que estes elementos apresentam em resposta ao intemperismo.

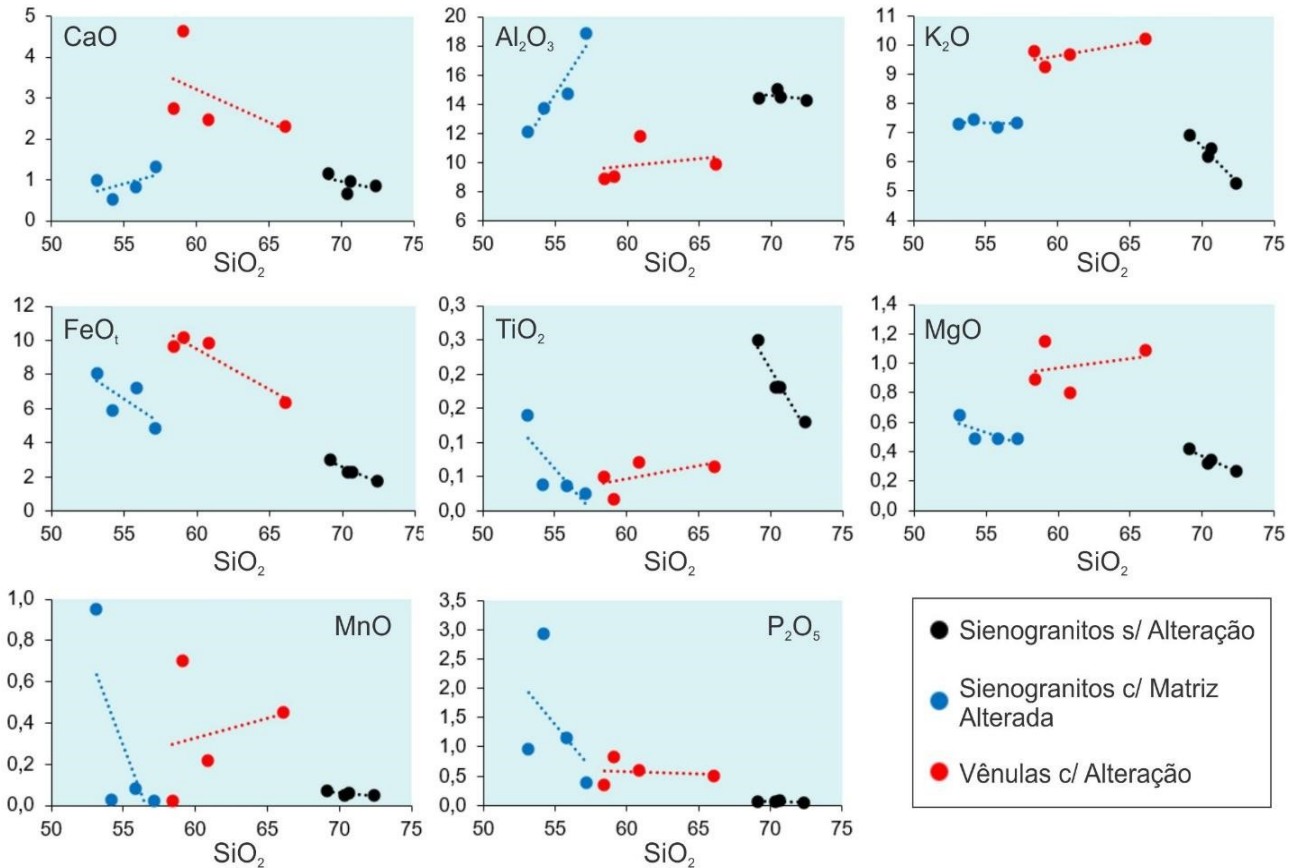


Figura 10. Diagramas de dispersão do tipo Harker para os sienogranitos sem alteração, sienogranitos com matriz alterada e vênulas com alteração hidrotermal. Resultados expressos em porcentagem (%). Fonte: Autores (2025).

Uma tentativa de quantificar a intensidade da alteração hidrotermal é demonstrada na Figura 11, que utiliza a concentração média dos elementos das rochas inalteradas como parâmetro de norma frente às concentrações obtidas nas rochas com alteração hidrotermal (matriz e vênulas). Desta forma, Si-Ti-Al mostram-se empobrecidos e Fe-Mn-Mg-

Ca-K-P apresentam enriquecimento nas rochas hidrotermalizadas.

5.3. Dados Estatísticos

Na tentativa de agrupar e correlacionar os dados geoquímicos em grupos populacionais, foram realizados estudos de estatística multivariada baseados na análise de cluster e componentes principais.

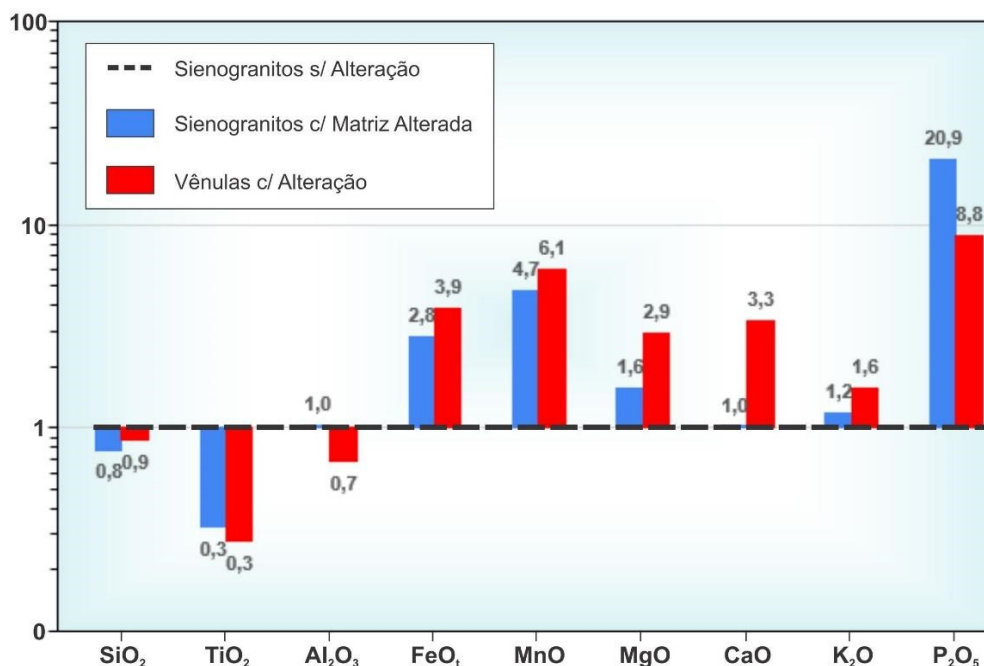


Figura 11. Mobilidade dos elementos químicos maiores, evidenciando que os produtos de alteração hidrotermal são enriquecidos em Fe-Mn-Mg-Ca-K-P (valores > 1) e depletados em Si-Ti-A (valores < 1), quando confrontados com a média das rochas sienograníticas não alterada (linha tracejada). Fonte: Autores (2025).

A análise de cluster (dendrograma) é uma técnica amplamente utilizada em geoquímica para classificar amostras de rochas com base na similaridade de seus atributos geoquímicos (concentrações de elementos). Na Figura 12A é mostrado o dendrograma obtido, onde pode-se notar que o agrupamento estatístico foi rigorosamente o mesmo daquele obtido com a análise petrográfica - macro e microscópica. A Figura 12B indica a existência de dois agrupamentos com forte similaridade (Ti-Mn-Mg-P-Ca & Fe-K), estes possuindo moderada similaridade com Al e fraca com Si.

A análise de componentes principais (PCA) é uma poderosa técnica estatística multivariada utilizada em geoquímica para simplificar e visualizar conjuntos de dados geoquímicos

complexos, correlacionando variáveis elementos químicos e variáveis amostras ao mesmo tempo para formar componentes principais de mais altas variâncias. A Figura 12C mostra o gráfico das duas componentes principais (Pc1 e Pc2), que juntas satisfazem 77,92% da variância dos dados estudados. Ao avaliar o gráfico de PCA, nota-se uma boa similaridade no agrupamento das classes petrográficas preestabelecidas. O evento dominante, determinado pela Pc1, é notadamente de caráter ígneo e representa uma correlação positiva entre Si-Ti-Ca-Mn-Mg-K. O evento secundário (Pc2), representado pela atividade hidrotermal, mostra uma correlação positiva entre Ca-Mn-Mg-K-Fe-P. Este dado é similar e corrobora a mobilidade elementar obtida na Figura 11.

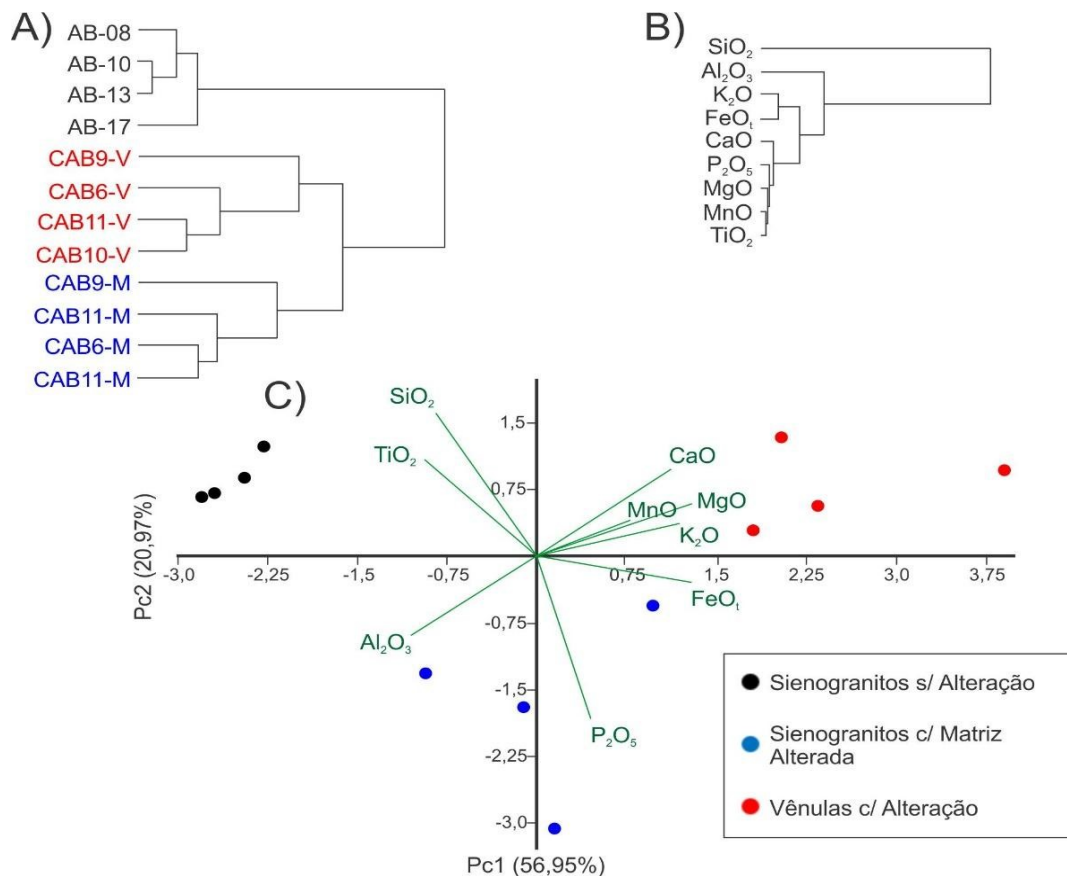


Figura 12. Dados obtidos a partir de estatística multivariada. A) Análise de cluster (dendrograma) a partir da similaridade das amostras e B) da similaridade das alterações. C) Análise de componentes principais (PCA) a partir da similaridade das amostras. Fonte: Autores (2025).

5.4. Evidências de um Sistema Mineral Hidrotermal do tipo *Intrusion-Related*

Ocorrências de cobre na forma de vênulas e/ou *stockworks* associadas a intrusões félsicas a intermediárias em contextos geotectônicos extensionais ou pós-colisionais são frequentemente descritas como pertencentes aos sistemas minerais do tipo *Intrusion-Related* (Hart, 2007). De acordo com Sillitoe & Thompson (2008), estes depósitos são formados a partir de fluidos magmático-hidrotermais de intrusões graníticas, que transportam metais frequentemente na forma de complexos cloretado s e sulfetados, apresentam zonas de alteração silícica, fílica, potássica e propílica e possui fertilidade

metalogenética principalmente para ouro, acompanhado por Bi, W, Te, As, Sb, Sn, Mo e Cu geralmente em baixa quantidade. O diagrama de Lang et al. (2000) apresenta o modelo de zoneamento genético para sistemas minerais do tipo *Intrusion-Related*, o qual interpretamos como similar ao contexto geológico-geotectônico-metalogenético daquele encontrado na ocorrência de cobre associado ao plúton Águas Belas.

De acordo com os dados de campo, petrográficos e geoquímicos obtidos neste trabalho, admitimos uma origem hidrotermal-magmática para o fluido (Figura 13), associada ao preenchimento de fraturas que deu origem às vênulas e que alterou as rochas encaixantes, posteriormente misturado com fluido meteórico de origem superficial.

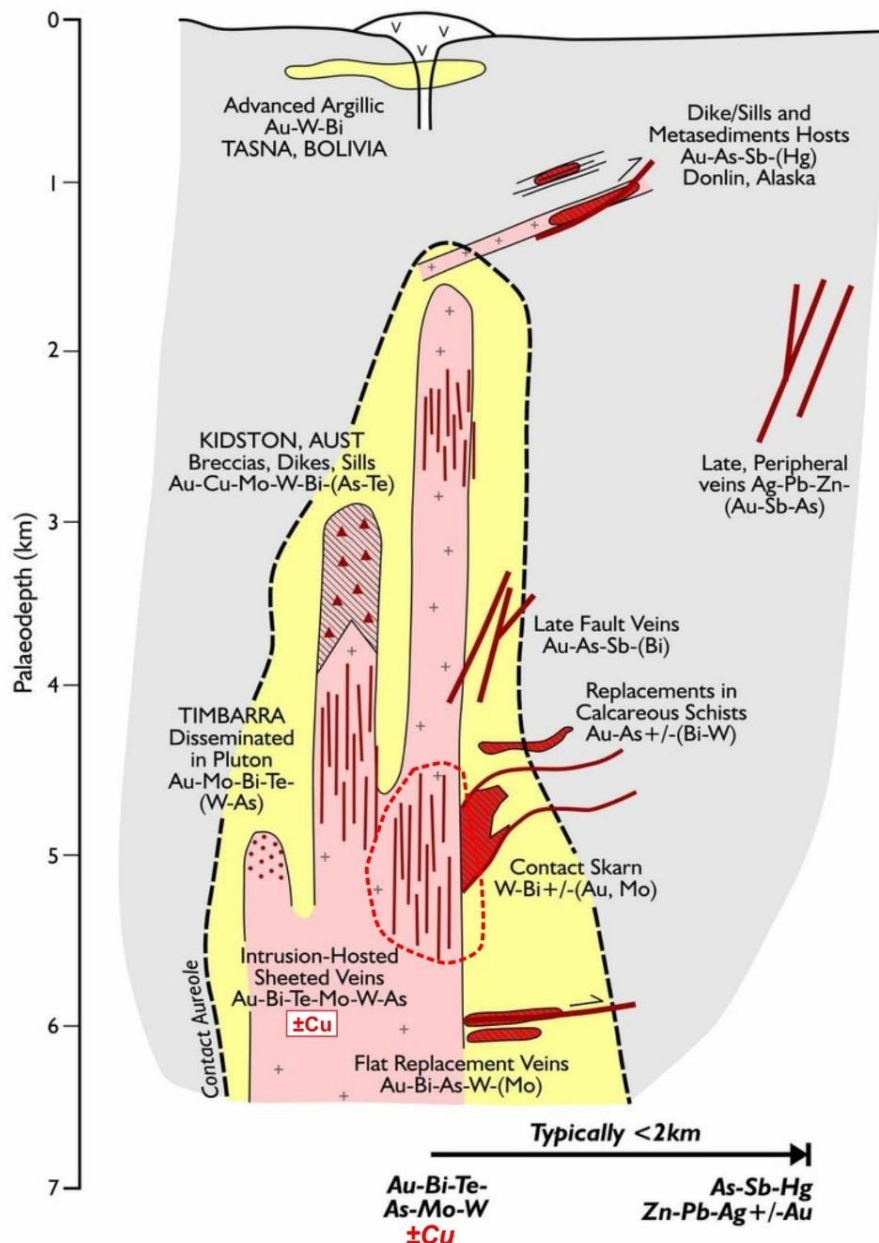


Figura 13. Diagrama mostrando o modelo de zoneamento genético para sistemas auríferos (portadores de cobre) relacionados a intrusões (*Intrusion-Related Deposit*). Fonte: Modificado de Lang et al. (2000).

6. CONCLUSÕES

O estudo petrográfico e geoquímico das rochas ígneas (sienitos, quartzo-sienitos e sienogranitos) do plúton Águas Belas confirmou sua composição mineralógica primária, dominada por K-feldspato, plagioclásio e quartzo, o qual dados da literatura o classifica como pós-colisional, calcialcalino de alto-K e alcalino. A principal descoberta concentra-

se na presença de um evento de alteração metassomática associado, manifestado por vênulas e halos de alteração hidrotermal na matriz sienogranítica. A análise de lâminas delgadas identificou as alterações mais proeminentes como propilitização (caracterizada por epidoto e clorita, indicando temperaturas médias a baixas e pH neutro) e silicificação, enquanto potassificação (sericita) e

sulfetação (pirita e calcopirita) ocorrem mais localmente.

A investigação geoquímica corroborou o estabelecimento deste sistema metassomático, apontou uma mobilidade significativa dos elementos maiores e menores nas rochas hidrotermalizadas e nas vênulas em comparação com a matriz inalterada. Elementos como Si, Ti e Al mostraram-se empobrecidos, enquanto Fe, Mn, Mg, Ca, K e P apresentaram enriquecimento, compatível com a mineralogia de alteração observada. Técnicas de estatística multivariada, como a análise de cluster e a Análise de Componentes Principais (PCA), confirmaram o agrupamento das amostras em classes petrográficas distintas (inalteradas, matriz alterada e vênulas), sendo o evento hidrotermal (Pc2) um fator dominante que reflete a correlação positiva de Ca, Mn, Mg, K, Fe e P, corroborando a mobilidade elementar destes elementos.

A presença da calcopirita e pirita nas vênulas e halos de alteração sugerem o carreamento e precipitação do cobre a partir de soluções hidrotermais. A tipologia das alterações, do tipo propilitização, potassificação, sulfetação e silicificação, e as condições físico-químicas inferidas para a atuação destes eventos (350°C a 200°C, pH neutro a ácido) são compatíveis com o estabelecimento de um sistema mineral do tipo *Intrusion-Related*, o que confere ao plúton Águas Belas o potencial metalogenético para hospedar ocorrências de cobre na região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Pernambuco pelo apoio institucional durante a realização da aula de campo da disciplina Geologia de Campo 3 (GE511), que motivou a realização deste manuscrito. Em adição, ao Laboratório de Geoquímica Aplicada ao Petróleo e Energia (LGAPE),

pela utilização da FRX-p para as análises geoquímicas.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9).
- Brito Neves, B. B. D., Santos, E. J. D., Van Schmus, W. R. 2000. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. *Tectonic Evolution of South America*.
- Brito Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Santos, E.J., Campos Neto, M.C., Kozuch M. 1995. O Evento Cariris Velhos na Província Borborema. *Revista Brasileira de Geociências* 25, 279-296, 1995.
- Caxito, F.A., Santos, L.C.M.L., Ganade, C.E., Bendaoud, A., Fettous, E.-H., Bouyo, M.H. 2020. Toward an integrated model of geological evolution for NE Brazil–NW Africa: The Borborema Province and its connections to the Trans-Saharan (Benino-Nigerian and Tuareg shields) and Central African orogens. *Braz. J. Geol.*, 50 (2020), e20190122. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190122>.
- Ferreira, V.P., Neves, C.H.S., Silva, T.R., Lima, M.M.C., Sial, A.N., Silva Filho, A.F. 2021. Neoproterozoic high magmatic addition rate episode building a composite batholith in northeastern Brazil, and implications for the western Gondwana assembly. *Precambrian Research*, 363 (2021) 106331. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106331>.
- Hart, C.J.R. 2007. Reduced intrusion-related gold systems, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada*:

- A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 95-112.
- Lang, J.R., Baker, T., Hart, C.J.R., Mortensen, J.K. 2000. An exploration model for intrusion-related gold systems: Society of Economic Geology Newsletter, v. 40, p. 1, 6–15.
- Neves, S.P. 2015. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brazil): Widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogen. *Journal of South American Earth Sciences* 58, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.08.004>.
- Neves, S.P. 2021. Comparative geological evolution of the Borborema Province and São Francisco Craton (eastern Brazil): Decratonization and crustal reworking during West Gondwana assembly and implications for paleogeographic reconstructions. *Precambrian Research*, 355, 106119. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106119>.
- Pirajno, F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer. 1250p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-8613-7>.
- Robb, L. 2005. *Introduction to Ore-Forming Processes*. Blackwell Science. 496p.
- Santos, E.J., Van Schmus, W.R., Kozuch, M., Brito Neves, B.B. 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 29, 61–76. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.003>.
- Sillitoe, R.H. & Thompson, J.F.H. 2008. Intrusion-Related Vein Gold Deposits: Types, Tectono-Magmatic Settings and Difficulties of Distinction from Orogenic Gold Deposits. *Resource Geology*. Volume 48, Issue 4. 237-250. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.1998.tb00021>.
- Silva Filho, A.F., Guimarães, I.P., Van Schmus, W.R. 2002. Crustal evolution of the Pernambuco–Alagoas complex, Borborema Province, NE Brazil: Nd isotopic data from neoproterozoic granitoids. *Gondwana Research* 5, 409–422. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70732-2](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70732-2).
- Silva Filho, A.F., Guimarães, I.P., Ferreira, V.P., Armstrong, R., Sial, A.N. 2010. Ediacaran Águas Belas plúton, Northeastern Brazil: Evidence on age, emplacement and magma sources during Gondwana amalgamation. *Gondwana Research* 17, 676–687. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.10.002>.
- Silva Filho, A.F., Guimarães, I.P., Santos, L., Armstrong, R., Van Schmus, W.R. 2016. Geochemistry, U–Pb geochronology, Sm–Nd and O isotopes of ca. 50 Ma long Ediacaran High-K Syn-Collisional Magmatism in the Pernambuco-Alagoas Domain, Borborema Province, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 134–154. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.12.013>.
- Silva Filho, A.F., Guimarães, I.P., Van Schmus, W. R., Armstrong, R., Silva, J.M.R., Cocentino, L.M., Osako, L.S. 2014. SHRIMP U–Pb zircon geochronology and Nd signatures of supracrustal sequences and orthogneisses constrain the Neoproterozoic evolution of the Pernambuco–Alagoas Domain,

southern part of Borborema Province, NE Brazil. *International Journal of Earth Sciences* 103, 2155–2190. <https://doi.org/10.1007/s00531-014-1035-4>.

Van Schmus, W. R., Oliveira, E. P., Silva Filho, A. F., Toteu, F., Penaye, J., Guimarães, I. P. 2008. Proterozoic Links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1), 69-99. <https://doi.org/10.1144/SP294.5>.