



Universidade de Brasília

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**GEOLOGIA, GEOQUÍMICA E MINERALIZAÇÃO DE SULFETOS DE NI-CU
NAS INTRUSÕES MÁFICO-ULTRAMÁFICAS DE NIKOLAUZ (HUÁNUCO,
PERU): EVIDÊNCIAS DE UM SISTEMA DE CONDUTO MAGMÁTICO
DINÂMICO GONDWÂNICO NA CORDILHEIRA ORIENTAL OROGÊNICA DOS
ANDES PERUANOS**

Abraham Alejandro Arana Vilca

Dissertação de mestrado N°540

Orientador: Prof. Dr. Cesar F. Ferreira Filho

Área de Concentração: Prospecção e Geologia Econômica

Brasília - DF

2025



Universidade de Brasília

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

**GEOLOGIA, GEOQUÍMICA E MINERALIZAÇÃO DE SULFETOS DE NI-CU
NAS INTRUSÕES MÁFICO-ULTRAMÁFICAS DE NIKOLAUZ (HUÁNUCO,
PERU): EVIDÊNCIAS DE UM SISTEMA DE CONDUTO MAGMÁTICO
DINÂMICO GONDWÂNICO NA CORDILHEIRA ORIENTAL OROGÊNICA DOS
ANDES PERUANOS**

Abraham Alejandro Arana Vilca

Dissertação de número 540 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília como requisito para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Área de Concentração: Prospeção e Geologia Econômica

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cesar Fonseca Ferreira Filho (IG-UnB) - Orientador

Prof. Dr. Valmir da Silva Souza (IG-UnB) - Titular interno

Prof. Dra. Rebecca Sproule (Mineral Resources-Tasmania) - Titular externo

Prof. Dra. Maisa Bastos Abram (CPRM – Suplente)

Brasília - DF

2025

Para meus pais, Alejandro e Verônica.

AGRADECIMENTOS

Ao longo deste processo, tive a sorte de contar com o apoio, a confiança e a orientação de pessoas extraordinárias, sem as quais este trabalho não teria sido possível.

Em primeiro lugar, a Jonas Mota, gerente de exploração da Rio Tinto no Peru e no Brasil, por ter sido muito mais do que uma referência profissional: um verdadeiro líder. Obrigado por confiar em mim desde o início, por me incentivar a desenvolver este estudo no projeto Nikolauz e por impulsionar uma experiência que transformou profundamente minha trajetória acadêmica e profissional.

A César F. Ferreira Filho, meu orientador, pelo acompanhamento constante tanto no plano acadêmico quanto humano. Seu conhecimento sobre sistemas magmáticos portadores de sulfetos de Ni-Cu foi uma orientação inestimável; mas, acima de tudo, sou grato pelos gestos que vão além da docência: desde os primeiros dias em Brasília, os almoços compartilhados e as conversas que, para além da ciência, construíram uma relação de mentoria e amizade.

À Rio Tinto, por ter sido o pilar estrutural deste mestrado. Não apenas pelo apoio financeiro, mas pelo compromisso genuíno com minha formação. Por me proporcionar a oportunidade de trabalhar em um projeto real e, mais recentemente, pelo apoio para apresentar este trabalho na SEG Conference 2025. Agradeço profundamente a confiança depositada em mim.

A Rebecca Sproule, por ter sido um eixo motivacional essencial neste processo. Sua experiência em geoquímica, magmatismo e tectônica aplicada a sistemas máfico-ultramáficos me permitiu articular duas dimensões fundamentais: o estudo do níquel como novo horizonte profissional e a geoquímica como uma das minhas paixões mais profundas. Obrigado por compartilhar seus conhecimentos e perspectivas com tanta generosidade.

Aos professores da Universidade de Brasília, cujo compromisso com o ensino deixou uma marca profunda. De cada disciplina levo ferramentas valiosas, especialmente em geocronologia e isotopia. Sou grato não apenas pelos conhecimentos transmitidos, mas também pelo ambiente acadêmico aberto, estimulante e diferente daquele ao qual eu estava acostumado. Aos meus

amigos da UnB, pelo companheirismo genuíno durante minhas estadias em Brasília. Obrigado pela orientação nos trâmites, pela ajuda com o idioma e pelas incontáveis conversas geológicas que ultrapassaram os corredores e as salas de aula.

A Renzo Yaringaño, amigo de muitos anos e uma das minhas maiores referências intelectuais. Nossas conversas sobre tectônica e metalogênese do Peru, em diferentes momentos e lugares, foram fonte constante de reflexão e aprendizado. Agradeço pelo exemplo, pelo olhar crítico e pela amizade constante.

A Geiner Pérez, companheiro de campo e grande amigo. Seu apoio foi fundamental desde as primeiras campanhas. Muitas de suas observações ao longo do projeto Nikolauz foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. E algumas de suas descobertas, ainda não revisadas, seguem à espera de serem plenamente explorada

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants.”

“Se enxerguei mais longe, foi por estar sobre os ombros de gigantes.”

~ Isaac Newton

RESUMO

Autor: Abraham Alejandro Arana Vilca

Título: GEOLOGIA, GEOQUÍMICA E MINERALIZAÇÃO DE SULFETOS DE NI-CU NAS INTRUSÕES MÁFICO-ULTRAMÁFICAS DE NIKOLAUZ (HUÁNUCO, PERU): EVIDÊNCIAS DE UM SISTEMA DE CONDUTO MAGMÁTICO DINÂMICO GONDWÂNICO NA CORDILHEIRA ORIENTAL OROGÊNICA DOS ANDES PERUANOS

Área de Concentração: Prospeção e Geologia Econômica

Orientador: Prof. Dr. Cesar F. Ferreira Filho

Ambientes orogênicos representam um espaço de busca subexplorado para depósitos de Ni-Cu-EGP em escala global. A intrusão máfico-ultramáfica de Nikolauz, localizada na Cordilheira Oriental do Peru, é um dos poucos sistemas de conduto mineralizados em sulfetos de Ni-Cu relatados dentro do terreno orogênico andino. Ela forma corpos alongados, com até 4 km de comprimento, compostos por rochas gabroicas cortadas por intrusões ultramáficas, hospedados em xistos metamórficos do Complexo Marañón. Apesar da alteração penetrante de olivina–piroxênio–plagioclásio ígneos, as texturas magmáticas estão amplamente preservadas, revelando corpos tubulares com zoneamento bem desenvolvido, consistindo em dunito adcumulate no núcleo, passando para peridotito, piroxenito e gabro em direção às margens.

A mineralização de Ni-Cu ocorre nas rochas ultramáficas como sulfetos disseminados, texturas blebby e agregados em rede. Geoquímica de rocha total ($\text{MgO} > 35\%$ em peso; $\text{Cr} > 2500$ ppm) e petrografia indicam que a intrusão consiste predominantemente em cumulatos de olivina, piroxênio e plagioclásio variavelmente alterados, sendo o dunito o principal tipo de rocha ultramáfica. Essas rochas são enriquecidas em elementos calcófilos (Ni : 2500–6000 ppm; $\text{Pd}+\text{Pt}$: 20–150 ppb) e exibem razões elevadas de Cu/Zr (>100) e Ni/MgO (>50) em rochas portadoras de sulfetos. A sistemática da geoquímica de elementos-traço revela que as rochas ultramáficas apresentam altas razões LREE/MREE ($\text{La}/\text{Sm} > 5$), enquanto a suíte máfico-ultramáfica possui afinidade cálcio-alcalina ($\text{MgO}/\text{FeO}_t = 0,5\text{--}0,8$; $\text{La} > \text{Nb}$; $\text{Th}/\text{Yb} = 0,1\text{--}10$; $[\text{Nb}/\text{Th}]_{\text{PM}} < 1$).

A geocronologia U–Pb em zircão fornece idades de cristalização entre 312 e 323 Ma, vinculando o magmatismo de Nikolauz a um evento gondwânico tardio a pós-compressivo, evidenciado por sua relação de corte com as foliações regionais famatinianas e pelo desenvolvimento de uma foliação local durante o alojamento. As evidências geológicas e geoquímicas apontam para fusão parcial de uma fonte mantélica piroxenítica durante descompressão litosférica, provavelmente desencadeada por slab break-off nos estágios finais da orogenia. O reconhecimento de um sistema de conduto dinâmico mineralizado em sulfetos de Ni-Cu em um ambiente orogênico paleozoico, agora exposto na Cordilheira Oriental do Peru, ressalta o potencial para depósitos semelhantes no domínio andino.

Palavras-chaves: intrusão Nikolauz; Ni-Cu sulfetos; ambientes orogênicos; geoquímica de traços.

ABSTRACT

Author: Abraham Alejandro Arana Vilca

Title: GEOLOGY, GEOCHEMISTRY, AND NI-CU SULFIDE MINERALIZATION IN THE MAFIC-ULTRAMAFIC INTRUSIONS OF NIKOLAUZ (HUÁNUCO, PERU): EVIDENCE OF A GONDWANAN DYNAMIC CONDUIT SYSTEM IN THE OROGENIC EASTERN CORDILLERA OF THE PERUVIAN ANDES

Field of Study: Prospecting and Economic Geology

Advisor: Prof. Dr. Cesar F. Ferreira Filho

Orogenic environments are an underexplored search space for Ni-Cu-PGE deposits globally. The Nikolauz mafic-ultramafic intrusion, located in the Eastern Cordillera of Peru, is one of the few Ni-Cu sulfide-mineralized conduit systems reported within the Andean orogenic terrane. It forms elongated bodies, up to 4 km long, consisting of gabbroic rocks crosscut by ultramafic intrusions hosted in metamorphic schists of the Marañón Complex. Despite the pervasive alteration of igneous olivine-pyroxene-plagioclase, magmatic textures are largely preserved, revealing tubular bodies with well-developed zoning consisting of adcumulus dunite at the core, grading into peridotite, pyroxenite and gabbro towards the margins.

Ni-Cu mineralization occurs within ultramafic rocks as sulfide disseminations, blebby textures, and net-textured aggregates. Whole-rock geochemistry ($\text{MgO} > 35 \text{ wt.}\%$, $\text{Cr} > 2500 \text{ ppm}$) and petrography indicate that the intrusion consists predominantly of variably altered olivine, pyroxene and plagioclase cumulates, with dunite as the principal ultramafic rock type. These rocks are enriched in chalcophile elements (Ni : 2500–6000 ppm; $\text{Pd} + \text{Pt}$: 20–150 ppb) and display elevated Cu/Zr (> 100) and Ni/MgO (> 50) ratios in sulfide-bearing rocks. Trace element geochemistry systematics reveal the ultramafic rocks have high LREE/MREE ratios ($\text{La/Sm} > 5$), while the mafic-ultramafic suite has a calc-alkaline affinity suite ($\text{MgO/FeO} = 0.5\text{--}0.8$; $\text{La} > \text{Nb}$; $\text{Th/Yb} = 0.1\text{--}10$; $[\text{Nb/Th}]_{\text{PM}} < 1$). U–Pb zircon geochronology yields crystallization ages between 312 and 323 Ma, linking the Nikolauz magmatism to a late to post-compressional Gondwanan event, as evidenced by its crosscutting relationship with regional Famatinian

foliations and the development of a local foliation during emplacement. Geological and geochemical evidence points to partial melting of a pyroxenitic mantle source during lithospheric decompression, likely triggered by slab break-off in the late stages of orogeny. The recognition of a dynamic, Ni-Cu sulfide-mineralized conduit system in a Paleozoic orogenic environment, now exposed in the Eastern Cordillera of Peru, underscores the potential for similar deposits in the Andean domain.

Keywords: Nikolauz intrusion; Ni-Cu sulfides; orogenic settings; trace element geochemistry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Mapa simplificado mostrando as sequências metamórficas (Complexo Marañón) e as principais unidades magmáticas da Cordilheira Oriental. O retângulo indica a região de Huánuco detalhada na Figura 2. As letras minúsculas indicam as unidades magmáticas: a. Balsas-Callangate, b. Pataz, c. Sitibamba-Pomabamba, d. Huacapistana, e. San Ramón, f. unidade granitóide Meso-Neoproterozóica, g. Complexo Querobamba, h. unidade granitóide Gondwânica, i. Cordilheira Carabaya. As figuras foram parcialmente modificadas de Chew et al. (2016, 2007) e Miskovic (2009).....**21**

Figura 2. Mapa geológico da região de Huánuco, destacando o Complexo Marañón e as unidades intrusivas. Estão indicados os quatro agrupamentos de intrusões máfico-ultramáficas reportados por Granding e Zegarra (1979). Esta figura utiliza dados geológicos do Ingemmet (Serviço Geológico do Peru).....**23**

Figura 3. Coluna estratigráfica das sequências metamórficas do Complexo Marañón e das unidades sedimentares sobrejacentes (Grupos Mitu e Pucará). Figura elaborada a partir de dados estratigráficos e geológicos de Megard (1979) e considerando dados de zircões detríticos U-Pb de Chew et al. (2008).....**25**

Figura 4. Mapa geológico do Projeto Nikolauz. Destacam-se as intrusões máfico-ultramáficas que cortam as sequências do Complexo Marañón, apresentando geometria alongada na direção NW (paralela à foliação local) e discordante em relação à foliação regional de orientação NNE. A estratigrafia mais jovem é representada pelos vulcanitos do Grupo Mitu e pelos carbonatos da Formação Pucará, ambos em discordância (ver Figura 3).....**26**

Figura 5. Geologia do Projeto Nikolauz. (A) Seção geológica SW-NE. Os furos de sondagem exibidos na seção correspondem àqueles mostrados no mapa geológico. Os corpos máfico-ultramáficos não sondados na porção NE da seção são interpretados com base em projeções do mapa geológico e em levantamentos geofísicos. (B) Porção detalhada da seção geológica incluindo os perfis de sondagem. Modificado de relatórios internos da Rio Tinto.....**29**

Figura 6. (A) Vista panorâmica a partir do local do furo de sondagem PAD01 em direção ao NE. A foto mostra a parte superior do Complexo Marañón Jovem em contato discordante com as unidades sobrejacentes dos Grupos Mitu e Pucará ao fundo. (B–G) Fotos e fotomicrografias de rochas xistosas do Complexo Marañón. (B) Afloramento de quartzito-mica xisto com foliação proeminente mergulhando para SW. (C–D) Quartzito-mica xisto variavelmente dobrado. (E) Afloramento de quartzito-mica xisto cinza-escuro com grafita. (F) Fotomicrografia de quartzito-mica xisto com “mica fish” e microestruturas S-C. (G) Porfiroblasto euédrico tardio-cinemático de granada em quartzito-mica xisto.....**33**

Figura 7. Fotos e fotomicrografias de rochas máfico-ultramáficas. (A) Afloramento de rocha gabroica bandada. (B) Rocha gabroica de granulação média com plagioclásio (Pl) tabular esbranquiçado e pseudomorfos anédricos pretos de piroxênio (Cpx). (C) Rocha gabroica de textura variável composta por piroxênio prismático alongado e Pl tabular com tamanho de grão distinto. (D) Rocha gabroica de textura variável com granulação heterogênea e

pseudomorfos anédricos pretos de Cpx. (E–F) Fotomicrografias de rocha gabroica mostrando Pl e pseudomorfos de Cpx; o retângulo tracejado em (E) é detalhado em (F). Pl é substituído por um agregado fino de epidoto (Ep) abundante, enquanto Cpx é substituído por actinolita (Act) e clorita (Chl). (G) Afloramento de dunito maciço (serpentinítico). (H) Dunito adcumulate com pseudomorfos de olivina (Ol) substituídos por serpentina e minerais opacos subordinados. (I) Fotomicrografia de dunito cumulático. Ol é substituído por serpentina (faixas esbranquiçadas) e magnetita (veios negros irregulares ao longo de fraturas). Pseudomorfos de cromita (Chr) ocorrem como cristais opacos subédricos. (J) Fotomicrografia de uma peridotita (tremolita–serpentinítico) com pseudomorfos de Ol em um agregado fino de tremolita (Amp), talco (Tlc) subordinado e Chl. Minerais opacos incluem magnetita e Chr. (K) Fotomicrografia de um piroxenito mostrando um relicto de Cpx em um agregado de Amp e Tlc subordinado. (L) Fotomicrografia de um piroxenito (tremolítico), composto por Amp de granulação fina a média.....**37**

Figura 8. Fotos e fotomicrografias de mineralização sulfetada. (A) Mineralização sulfetada de textura em rede em dunito. Os pseudomorfos de olivina estão parcial ou completamente englobados por sulfetos. (B–C) Glóbulos de sulfetos intersticiais a pseudomorfos de olivina. Observa-se um halo de alteração esbranquiçado nos pseudomorfos de olivina adjacentes aos glóbulos de sulfetos. (D) Fotomicrografia mostrando um halo de alteração amarronzado desenvolvido ao redor dos glóbulos de sulfetos no dunito hospedeiro. (E–F) Fotomicrografias de glóbulos de sulfetos; os sulfetos consistem em pirrotita (Po) e, subordinadamente, pentlandita (Pn) e calcopirita (Ccp). Nota-se a alteração parcial dos sulfetos para magnetita (Mag). (G–I) Fotomicrografias de glóbulos de sulfetos variavelmente alterados para magnetita e hidróxidos de Fe. Os sulfetos consistem principalmente em pirrotita (Po) com pequena proporção de calcopirita (Ccp).....**38**

Figura 9. Diagramas de elementos maiores em rocha total das rochas máfico-ultramáficas (MUM) das intrusões de Nikolauz. (A) MgO vs. SiO₂; (B–G) MgO vs. TiO₂, Al₂O₃, CaO, Na₂O+K₂O, Cr e FeO; (H–I) Mg# vs. Al₂O₃ e Ti. Campos de rochas cumuláticas/não cumuláticas de Barnes (2023). Médias minerais de Lu et al. (2019); área preta: Ol-Cpx-Pl.....**43**

Figura 10. (A) Padrões de elementos terras raras normalizados ao manto primitivo e (B) padrões de elementos traço resistentes à alteração para os teores médios das rochas máfico-ultramáficas das intrusões de Nikolauz. Os valores de normalização ao manto primitivo são de Sun e McDonough (1989).....**48**

Figura 11. Diagramas de elementos traço para as rochas máfico-ultramáficas das intrusões de Nikolauz. (A) Escala logarítmica de MgO versus Hf. (B) Cu/Zr versus Hf. (C) Escala logarítmica de MgO versus La/Sm. (D) Ni/MgO (utilizado como índice de saturação em Ni) versus La/Sm.....**51**

Figura 12. (A) Diagrama ternário La-Y-Nb: A maioria das amostras se agrupa próximo ao vértice de La, indicando enriquecimento em La e forte empobrecimento em Nb e Y, consistente com uma assinatura geoquímica calco-alcalina. (B) Diagrama AFM: Com base nas razões MgO/FeO, os gabros iniciais exibem comportamento fracamente calco-alcalino, enquanto as unidades

máfico-ultramáficas cumuláticas se posicionam dentro do campo calco-alcálico. (C) Razões Nb/Th e La/Sm normalizadas ao manto: As rochas máfico-ultramáficas cumuláticas exibem uma tendência do Manto Primitivo (PM) em direção às médias da crosta continental, sugerindo contribuição crustal significativa. (D) Razões Th/Yb e Nb/Yb: As rochas máfico-ultramáficas seguem uma tendência entre o Manto Primitivo (PM) e a Crosta Superior (UC), indicando fontes mantélicas metasomatizadas influenciadas por aporte crustal.....54

Figura 13. (A) Diagrama Ti versus V/Sc. O Ti mínimo e o Mg# máximo (~89.5) refletem magmas primitivos próximos à sua fonte mantélica. Nessas condições, o V/Sc atinge ~6.48, representando olivina primitiva. Ao longo da tendência cumulática máfico-ultramáfica (Mg# 72–84), valores médios de V/Sc foram estabelecidos em ~3.7 para gabros e ~10.74 para dunitos. (B) V/Sc em rocha total versus F% (grau de fusão parcial), baseado em Cao et al. (2020). O valor de ΔFMQ do magma primitivo calculado (FMQ+2.6), derivado da fórmula de Shishkina et al. (2018) utilizando V/Sc_OI e V/Sc_dunito, foi interpolado com valores de V/Sc em rocha total segundo o diagrama de Cao et al. (2020). A interseção da curva FMQ+2.6 com o valor de V/Sc (~10.74) dos dunitos médios (Mg# 84) sugere um grau de fusão parcial de ~18%. (C) Diagrama V/Sc versus Mg#. Dunitos (Mg# 84) mostram um V/Sc médio de ~10.74, diminuindo para ~3.7 em gabros cumuláticos diferenciados (Mg# 72). Gabros ricos em Ti (Mg# <65) exibem um V/Sc médio de ~8.0. (D) Diagrama Ni+Cu versus Mg#. Amostras enriquecidas em Ni–Cu (>2800 ppm) são definidas, com a maioria das amostras mineralizadas concentrando-se em torno de Mg#: 84 ± 2.555

Figura 14. (A) O diagrama Cu/Zr versus Ni/MgO mostra uma forte correlação positiva entre essas razões, destacando que rochas com Ni/MgO elevado (>50) e Cu/Zr (>100) representam adcumulate ultramáficos altamente saturados em sulfetos. (B) Ni+Cu (ppm) vs. Se (ppm): observa-se uma forte correlação entre Ni-Cu e Se, sugerindo que a distribuição geoquímica desses metais é controlada pelos sulfetos. O Se, devido à sua afinidade calcófila e maior estabilidade em relação ao S em ambientes metasomatizados, permanece concentrado em zonas mineralizadas. (C) O diagrama S (wt%) versus Se (ppm) da intrusão San José mostra duas tendências principais: uma tendência de alta inclinação (S/Se ~25.000), associada a maior contaminação crustal, e uma tendência de inclinação mais baixa (S/Se 4350–6100), refletindo a assinatura magmática de Nikolauz, com S/Se médio de ~5065. (D) O diagrama Cr versus Pd+Pt mostra uma forte correlação positiva, em que as maiores concentrações de Pd+Pt (~20–150 ppb) estão associadas a rochas ultramáficas cumuláticas ricas em cromita. (E–F) Os diagramas S (wt%) versus Ni100%(S) e Cu100%(S) ilustram estimativas sintéticas derivadas de valores de S baseados em Se. Estes fornecem tendências qualitativas na distribuição de Ni e Cu, mas não devem ser considerados teores definitivos, já que podem estar superestimados.....58

Figura 15. Perfis litogeoquímicos ao longo da sondagem NIKZ0001 mostrando Mg#, MgO, FeO, Cr, TiO₂, Al₂O₃, CaO e SiO₂. As barras coloridas à esquerda representam os intervalos litológicos descritos no testemunho. As faixas sombreadas em púrpura destacam as intrusões dunitíticas, caracterizadas por valores elevados de Mg# e MgO, enriquecimento em Cr e mínimos de TiO₂, Al₂O₃, CaO e SiO₂, compatíveis com a acumulação de olivina ± cromita. As

transições para peridotitos/piroxenitos e, finalmente, para gabros são reconhecidas pela diminuição de Mg# e pelo aumento progressivo de TiO_2 , Al_2O_3 , CaO e SiO_2 , refletindo maior participação de piroxênios e plagioclásio. Os altos valores de SiO_2 permitem identificar intrusões graníticas, especialmente na base da sondagem. Os dados de rocha total provêm do banco geoquímico da Rio Tinto; as unidades estão indicadas nos eixos.....60

Figura 16. Perfis litogeoquímicos do furo NIKZ0002 mostram a distribuição vertical de elementos calcófilos (Ni, Cu, Pd, Pt, S e Se), integrados a proxies de controle litológico e metalogênico. O Cr é utilizado como elemento de referência litófilo, por refletir diretamente a abundância relativa de minerais primários ricos em cromita, enquanto a razão Cu/Zr é empregada como indicador de saturação em sulfetos, funcionando como um proxy de enriquecimento metálico e possível segregação de fases sulfuradas. A leitura integrada dos perfis permite reconhecer três domínios principais: (i) as intrusões ultramáficas, destacadas pela área sombreada em roxo-azulado, caracterizadas por maiores teores de Cr e Mg# e baixos valores de elementos incompatíveis, refletindo acumulação cumulática de olivina $\pm$ cromita; (ii) a zona máfica, de litologias verdes na legenda, caracterizada por baixos valores de Cr e Mg#; e (iii) a zona enriquecida em sulfetos disseminados de Ni-Cu, destacada pela área sombreada em vermelho, onde se observa um incremento sistemático de Ni, Cu, Pd, Pt, S e Se, em associação a um aumento significativo da razão Cu/Zr. Esse padrão sugere a presença de um intervalo favorável à acumulação de sulfetos magmáticos, interpretado como o principal horizonte mineralizado dentro da intrusão máfico-ultramáfica. A integração desses dados com a estratigrafia litológica do furo permite não apenas diferenciar entre intrusões cumuláticas ultramáficas e zonas máficas, mas também identificar os níveis duniticos favoráveis à mineralização de Ni-Cu.....61

Figura 17. Idades U–Pb em zircões de quatro intrusivos da Cordilheira Oriental. (A) O sienogranito famatiniense registra uma idade concordia de 467.9 ± 2.1 Ma, representando um pulso magmático reduzido e acompanhado por zircões herdados. (B–D) As unidades máficas gondwânicas apresentam idades entre 323 e 305 Ma, refletindo um magmatismo pós-colisional associado a condições variando de oxidantes a intermediárias. A presença de zircões herdados em alguns destes corpos indica assimilação crustal durante a evolução magmática.....64

Figura 18. Idades U–Pb em zircões de quatro intrusivos máficos gondwânicos (347–313 Ma), marcados por variações nas condições redox e ocorrência isolada de zircões herdados.....65

Figura 19. Zircões dos gabros de Nikolauz indicam magmas calco-alcalinos de arco, oxidantes e hidratados, com forte influência crustal e empobrecimento em Nb. Em contraste, zircões jurássicos e triássicos exibem maior diversidade geoquímica, com assinaturas peralcalinas e dos tipos A e S, menor aporte crustal e ampla variação redox e hídrica.....67

Figura 20. Zircões dos gabros de Nikolauz registram temperaturas de 780–875 °C e alta fugacidade de oxigênio ($\Delta\text{FMQ} \approx +0,5$ a $+2,5$), indicando magmas calco-alcalinos, hidratados e oxidantes.....70

Figura 21. Gráficos temporais de ΔFMQ e $10^4 \times (Eu/Eu^*)/Yb_n$ em zircões destacam a assinatura oxidante e hidratada dos gabros de Nikolauz, reforçando sua origem calco-alkalina de arco. Em contraste, zircões famatinianos e proterozóicos mostram condições magmáticas mais secas e redutoras, refletindo diferenças na evolução tectono-magmática ao longo do tempo.....70

Figura 22. Diagrama tempo-temperatura mostra que os gabros de Nikolauz (~315–305 Ma, 850–1150 °C) se formaram em contexto pós-compresional, com fases cumuláticas e mineralização Ni-Cu. Magmatismo félsico, metamorfismo e deformação gondwânica ocorrem em distintos domínios térmicos.....73

Figura 23. Representação esquemática do conduto magmático dinâmico de San José. (A) Chonólito tubular constituído por um corpo gabroico cortado por pulsos cumuláticos ultramáficos. (B) Vista longitudinal do conduto dinâmico de San José, ilustrando o fluxo lateral de material ultramáfico. (C) Zoneamento composicional esquemático de um pulso cumulático ultramáfico, destacando variações em direção às margens associadas à diferenciação magmática e ao resfriamento progressivo. Indicadores geoquímicos-chave também estão representados.....75

Figura 24. Seção longitudinal esquemática ilustrando o modelo intrusivo para o conduto ultramáfico hospedeiro de sulfetos de Ni-Cu em San José. O modelo evolui através de estágios distintos que refletem tanto a dinâmica magmática quanto a resposta da crosta hospedeira: (t1) o emplazamento inicial de magmas máficos não cumuláticos em forma de sill canalizado, associado ao pico de deformação crustal; (t2) a ascensão de magmas derivados de fontes piroxeníticas, associada a rollback/slab break-off, o que promoveu circulação térmica intensa e o desenvolvimento de fluxos boniníticos cristalizando no interior da estrutura canalizada; (t3) o avanço da fracionamento, acompanhado por resfriamento progressivo e condições redox mais redutoras, que levaram à saturação em sulfetos de Ni-Cu e à formação de mineralizações localizadas ao longo do conduto; (t4) finalmente, o calor magmático sustentado induziu fusão parcial da crosta, resultando em intrusões félsicas tardias e em episódios de metasomatismo, configurando um regime de magmatismo bimodal típico de sistemas pós-colisionais.....78

Figura 25. Modelo tectono-magmático esquemático ilustrando a formação da mineralização de sulfetos de Ni-Cu no sistema magmático dinâmico de San José. i. Pennsylvaniano inicial: Magmas máficos de origem peridotítica ascendem verticalmente pela crosta, sendo canalizados em um sistema de sills superiores, estabelecendo a arquitetura fundamental do conduto. ii. Pennsylvaniano médio: Um evento de slab break-off promove a ascensão de magmas derivados de uma fonte mantélica piroxenítica, gerando magmas parentais boniníticos. O aporte térmico associado desencadeia circulação dinâmica, com fluxos laterais ultramáficos no sill, criando condições favoráveis à saturação e segregação de sulfetos de Ni-Cu. iii. Pennsylvaniano tardio: O calor sustentado induz fusão crustal significativa, originando a intrusão de magmas félsicos tardios, refletindo magmatismo bimodal e marcando o estágio final da evolução cortical.....80

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: Introdução, justificativa e contexto geológico do Projeto Ni-Cu Nikolauz	18
1.1. Introdução.....	18
1.2. Objetivos.....	21
<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>21</i>
1.3. Organização da dissertação.....	22
1.4. Vias de acesso	23
1.5. Geologia Regional.....	25
1.5.1 <i>Contexto Geológico da Cordilheira Oriental</i>	<i>25</i>
1.5.2. <i>Geologia da Região Huánuco</i>	<i>27</i>
1.5.2.1 <i>Complexo Marañon</i>	<i>27</i>
1.5.2.2 <i>Intrusões Máficas-ultramáficas</i>	<i>29</i>
1.5.2.3 <i>Grupos Mitu e Pucará.....</i>	<i>30</i>
1.5.3. <i>Contexto tectônico da Cordilheira Oriental.....</i>	<i>31</i>
1.5.3.1. <i>Mesoproterozóico (1325 – 930 Ma)</i>	<i>32</i>
1.5.3.1. <i>Neoproterozóico (850 – 635 Ma)</i>	<i>33</i>
1.5.3.1. <i>Famatiniano (575 – 415 Ma)</i>	<i>33</i>
1.5.3.1. <i>Gondwânico (380 – 275 Ma).....</i>	<i>34</i>
1.5.3.1. <i>Permo-Triássico e Triássico-Jurássico (270 – 170 Ma).....</i>	<i>34</i>
CAPÍTULO II: Materiais, Técnicas de Amostragem e Procedimentos Analíticos Aplicados	35
2.1. Dados de Campo Geológico	35
2.2. Estudos Petrográficos	35
2.3. Análises Geoquímicas de rocha total.....	37
2.4. Separação de zircões e preparação das amostras	38
2.5. Análises por microsonda eletrônica.....	38
2.6. Geocronologia U–Pb em zircão	38
2.7. Análise de elementos traço em zircão	39
CAPÍTULO III: Características magmáticas e registro petrográfico das intrusões máfico-ultramáficas do Projeto Nikolauz: evidências de mineralização de Ni-Cu na Cordilheira Oriental do Peru.....	40
3.1. Rochas encaixantes.....	40
3.2. Granitoides	41
3.3. Intrusões máfico-ultramáficas	43

3.4. Mineralização em sulfetos.....	44
CAPÍTULO IV: Geoquímica de elementos maiores e traço: zonamento máfico-ultramáfico, distribuição de elementos calcófilos e implicações petrogenéticas	46
4.1. Elementos maiores y menores	46
4.2. Elementos traço	48
4.3. Elementos calcófilos.....	55
4.4. Zonificación máfico-ultramáfica	58
CAPÍTULO V: Geocronologia e Geoquímica de Zircões: Características Tectono-Magmáticas das Intrusões Máfico-Ultramáficas de Nikolauz da Cordilheira Oriental do Peru.....	61
5.1. Geocronologia U-Pb em Zircão das Intrusões Gabroicas de Nikolauz	61
5.2. Geoquímica de Zircão.....	64
5.3. Diferenças entre as intrusões de Nikolauz e as da Cordilheira Oriental.	67
5.3.1 Assinaturas e populações de zircões da Cordilheira Oriental	67
5.3.2 Variação temporal de FMQ e proxy de H ₂ O	68
CAPÍTULO VI: Sistema de Conduto Máfico-Ultramáfico das Intrusões de Nikolauz: Implicações para a Gênese de Sulfetos de Ni-Cu em Contexto Gondwânico da Cordilheira Oriental do Peru.....	70
6.1 Discussões	70
6.1.1 Sistema de conduto dinâmico em ambiente orogênico	70
6.1.2. Ambiente magmático e magma parental	72
6.1.3 Gênese dos sulfetos de Ni-Cu na intrusão de Nikolauz	75
6.1.4 Exploração de depósitos orogênicos de Ni-Cu no Peru	77
6.2 Conclusões.....	79
Referências.....	82
Anexos	91
<i>Anexo 1. Resumo petrográfico das rochas máfico-ultramáficas do Nikolauz</i>	
<i>Anexo 2. Geoquímica das intrusões máfico-ultramáficas e das rochas encaixantes</i>	
<i>Anexo 3. Conteúdo metálico das unidades máfico-ultramáficas de Nikolauz</i>	
<i>Anexo 4. Geocronologia U–Pb em zircões de Nikolauz e do granito de Huánuco</i>	
<i>Anexo 5. Manuscrito do trabalho "Geology and geochemistry of the Nikolauz mafic-ultramafic intrusions, Chinchao-Huánuco: evidence of a Ni-Cu sulfide mineralized conduit system in the orogenic Eastern Cordillera of the Peruvian Andes". Primeiro trabalho a ser submetido com os resultados obtidos na Dissertação de Mestrado</i>	

CAPÍTULO I: Introdução, justificativa e contexto geológico do Projeto Ni-Cu Nikolauz

1.1. Introdução

Os depósitos de sulfetos magmáticos são amplamente compreendidos como formados pela acumulação de gotículas de sulfetos imiscíveis segregadas a partir de magmas máfico-ultramáficos originados no manto. Esses magmas de alta temperatura, caracterizados por elevados teores de Ni-Cu-EGP (Elementos do Grupo da Platina), atingem condições para formar depósitos magmáticos de Ni-Cu-EGP quando fazem parte de um sistema de conduto dinâmico, que fornece trajetórias ideais para o transporte de magmas silicatados e para a segregação, enriquecimento em metais e acumulação de líquidos sulfetados (e.g., Naldrett, 2004; Barnes e Lightfoot, 2005; Barnes et al., 2016). Altos volumes de magma máfico-ultramáfico são gerados por altos graus de fusão parcial do manto, geralmente associados ao impacto de plumas mantélicas sobre a litosfera. Essas condições representam os melhores alvos potenciais para depósitos magmáticos de sulfetos e estão tipicamente ligadas às Grandes Províncias Ígneas (LIP), onde os maiores volumes de fluxo magmático desencadeiam um ambiente mais dinâmico (e.g., Ernst, 2014; Ernst e Jowitt, 2013; Leshar, 2019).

Depósitos de sulfetos de Ni-Cu em ambientes orogênicos, como Americano do Brasil, Aguablanca, Huangshandong e Hongqiling, apresentam menores dimensões e menores teores em comparação com aqueles encontrados em Grandes Províncias Ígneas (Mota-e-Silva et al., 2011; Piña et al., 2010; Mao et al., 2017; Lu et al., 2019). No entanto, a descoberta do depósito de Xiarihamu (157 Mt a 0.65% Ni) no terreno de arco paleozoico de Kunlun Oriental (na parte norte do Planalto Qinghai-Tibete, China) demonstra que depósitos de Ni-Cu de classe mundial podem, de fato, formar-se em ambientes orogênicos sob condições específicas (Li et al., 2015; He et al., 2022). A demanda recente por Ni e Co como metais críticos para sustentar a transição para energias mais limpas renovou o interesse pela exploração de depósitos magmáticos associados a magmas máfico-ultramáficos. Ambientes orogênicos pouco explorados para depósitos de Ni-Cu-EGP oferecem oportunidades particularmente importantes para exploração greenfield em escala global.

O primeiro estudo sistemático de Ni nos Andes peruanos foi realizado entre 1974 e 1977 em um projeto de colaboração entre o serviço geológico peruano (INGEOMIN) e o francês (ORSTOM). Durante esse período, corpos máfico-ultramáficos com mineralização subordinada de Ni-Cu associada foram reconhecidos em setores da Cordilheira Oriental, como Chinchao, Tantamayo, Huancapallac e Churubamba (Guillon e Zegarra, 1977). No início da década de 1980, novos estudos focados no potencial econômico para depósitos de Ni-Cu em Chinchao-Huánuco foram desenvolvidos sob um acordo de cooperação mineradora hispano-peruano. No entanto, esses estudos concluíram que as anomalias de Ni-Cu investigadas resultavam da segregação de sulfetos em fragmentos ofiolíticos, interpretados como remanescentes de antiga crosta oceânica (Misión Española, 1983). Essa interpretação genética das unidades máfico-ultramáficas reduziu o interesse pela exploração de depósitos magmáticos na Cordilheira Oriental, que continuou a ser interpretada como composta por corpos ofiolíticos em estudos posteriores (e.g., Rodríguez, 2010).

Buscando um novo espaço de prospecção, a Rio Tinto iniciou em 2021 um programa para avaliar o potencial de depósitos de Ni-Cu-EGP na Cordilheira Oriental do Peru. Com base em dados de exploração adquiridos nas intrusões máfico-ultramáficas de Nikolauz (MUM), que incluem mapeamento, sondagens e levantamentos geoquímico-geofísicos, elas foram reinterpretadas como parte de um sistema magmático complexo que intrude as rochas metamórficas do Complexo Marañón. Este estudo apresenta os resultados que levaram a essa nova interpretação, incluindo características petrológicas das intrusões máfico-ultramáficas hospedeiras de mineralização de sulfetos de Ni-Cu. Nosso estudo destaca variações composicionais e texturais ao longo das intrusões, que consistem em múltiplas rochas de dunitos-peridotitos intrudindo unidades gabroicas. Por fim, este trabalho propõe que os sulfetos de Ni-Cu das intrusões MUM de Nikolauz pertencem a um sistema de conduto magmático dinâmico localizado nos ambientes orogênicos da Cordilheira Oriental dos Andes peruanos. Esses resultados destacam o potencial para depósitos de Ni-Cu ao longo da Cordilheira Oriental, acrescentando, assim, um novo e amplo cenário prospectivo para depósitos magmáticos orogênicos de sulfetos.

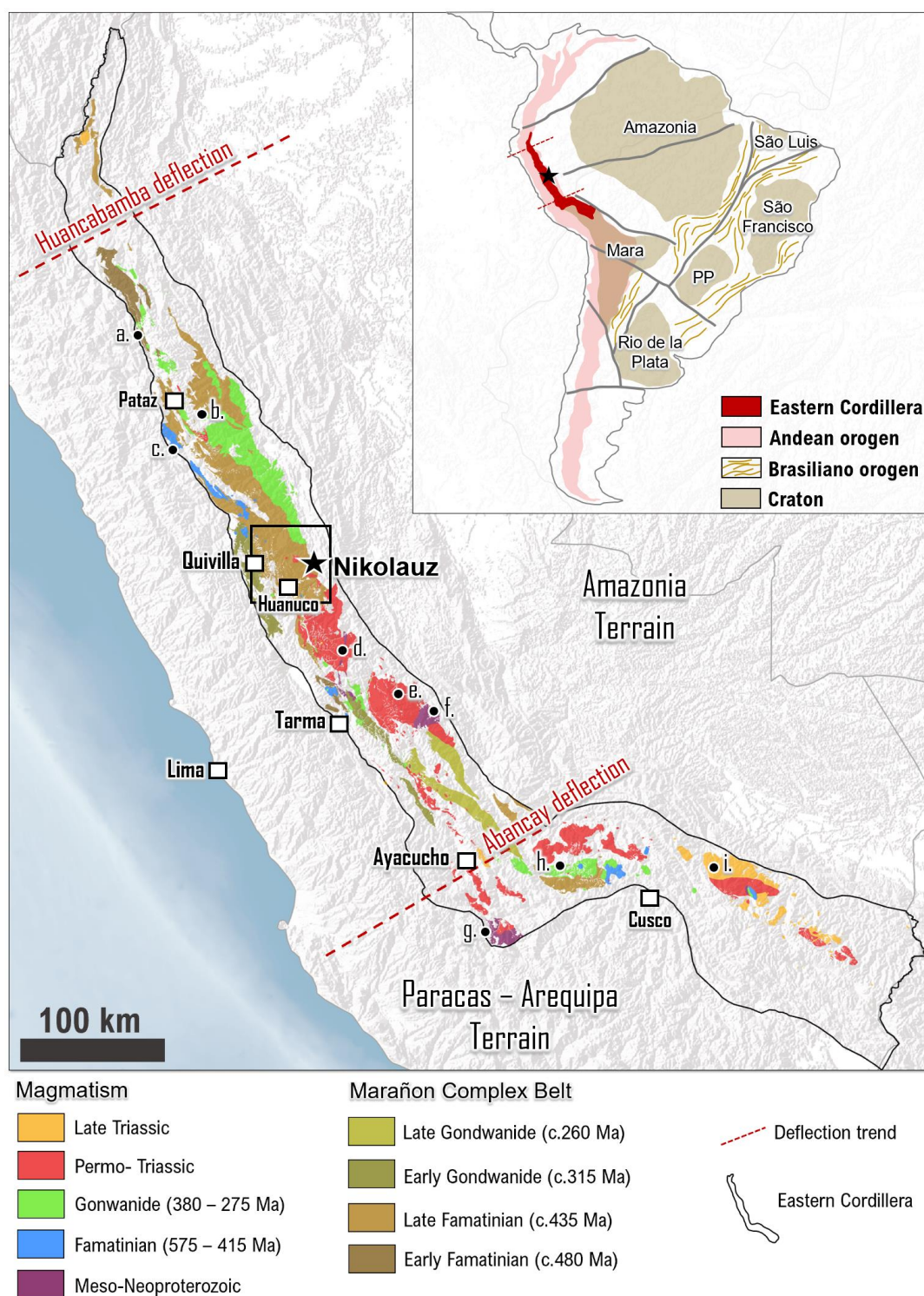


Fig. 1. Mapa simplificado mostrando as sequências metamórficas (Complexo Marañón) e as principais unidades magmáticas da Cordillera Oriental. O retângulo indica a região de Huánuco detalhada na Figura 2. As letras minúsculas indicam as unidades magmáticas: a. Balsas-Callangate, b. Pataz, c. Sitibamba-Pomabamba, d. Huacapistana (Meso-Neoproterozóico), e. San Ramón, f. unidade granitóide Meso-Neoproterozóica, g. Complexo Querobamba, h. unidade granitóide Gondwânica, i. Cordillera Carabaya. As figuras foram parcialmente modificadas de Chew et al. (2016, 2007) e Miskovic (2009).

1.2. Objetivos

Objetivo Geral

Definir o modelo genético da mineralização de sulfetos de Ni-Cu e os controles tectônicos, estruturais e magmáticos em escalas regional e local na área do projeto Nikolauz, por meio da integração de petrografia detalhada, geoquímica de rocha total, geoquímica e geocronologia U–Pb em zircões.

Objetivos Específicos

A. Geología e estrutura

- Reconstruir o arcabouço tectônico da margem ocidental de Gondwana durante o Paleozoico Inferior, com ênfase nas estruturas que controlaram o emplazamento dos magmas máfico-ultramáficos de Nikolauz.
- Mapear estruturas locais (dobras, falhas, zonas de fraqueza) que controlaram a intrusão máfico-ultramáfica.

B. Petrologia e texturas

- Identificar fácies, texturas cumuláticas e sequência de cristalização.
- Definir geometria interna e condições de alojamento.

C. Geoquímica e evolução magmática

- Determinar a afinidade tectonomagmática das unidades MUM por meio de análises de elementos maiores, traço e terras raras.
- Inferir evolução do magma parental (fonte, fracionamento, contaminação) e parâmetros como fugacidade de oxigênio (fO_2) e teor de H_2O .

D. Cronologia e proxies

- Determinar a cronologia do evento máfico-ultramáfico por meio de geocronologia U–Pb em zircões.
- Interpretar as condições redox, o grau de hidratação magmática e a interação crustal utilizando proxies como (e.g., Ce/Nb , $10^4 \cdot (Eu/Eu^*)/Yb(N)$, Th/Nb , U/Yb).

E. Modelo genético Ni-Cu

- Integrar dados petrográficos, geoquímicos e estruturais para explicar saturação e concentração de sulfetos.
- Avaliar papel da crosta, oxidação e dinâmica de fluxo na precipitação metálica.

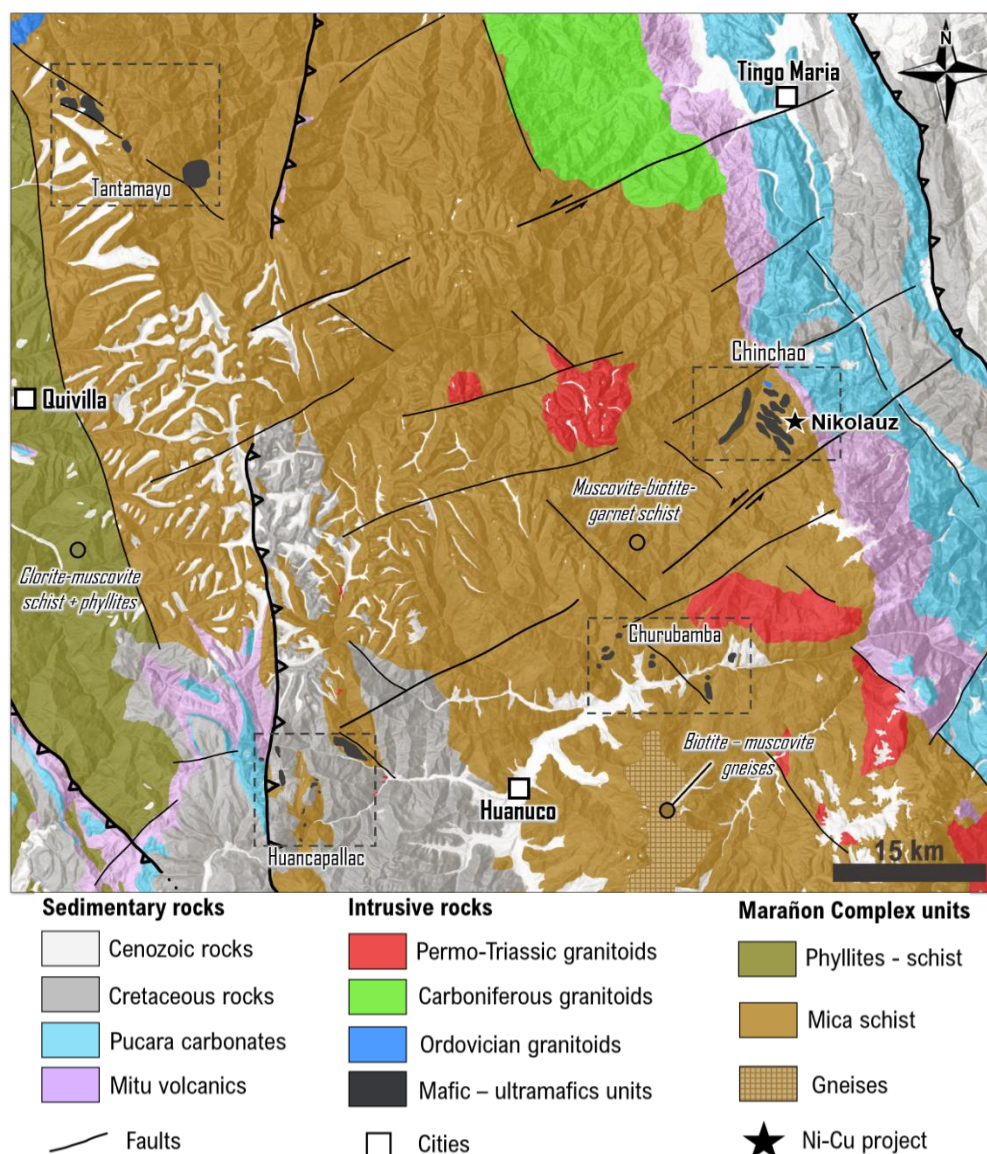


Fig. 2. Mapa geológico da região de Huánuco, destacando o Complexo Marañón e as unidades intrusivas. Estão indicados os quatro agrupamentos de intrusões máfico-ultramáficas reportados por Granding e Zegarra (1979). Esta figura utiliza dados geológicos do Ingemmet (Serviço Geológico do Peru).

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação de mestrado encontra-se dividida em seis capítulos, descritos resumidamente a seguir. Com exceção do Capítulo V, a dissertação está baseada no manuscrito do trabalho "Geology and geochemistry of the Nikolausz mafic-ultramafic intrusions, Chinchao-Huánuco: evidence of a Ni-Cu sulfide mineralized conduit system in the orogenic Eastern Cordillera of the Peruvian Andes", primeiro trabalho a ser submetido com os resultados obtidos na Dissertação de Mestrado

- **CAPÍTULO I:** Introdução, justificativa e contexto geológico do Projeto Ni-Cu Nikolauz.
- **CAPÍTULO II:** Materiais, Técnicas de Amostragem e Procedimentos Analíticos Aplicados.
- **CAPÍTULO III:** Características magmáticas e registro petrográfico das intrusões máfico-ultramáficas do Projeto Nikolauz: evidências de mineralização de Ni-Cu na Cordilheira Oriental do Peru.
- **CAPÍTULO IV:** Geoquímica de elementos maiores e traço: zonamento máfico-ultramáfico, distribuição de elementos calcófilos e implicações petrogenéticas.
- **CAPÍTULO V:** Geocronologia e Geoquímica de Zircões: Características Tectono-Magmáticas das Intrusões Máfico-Ultramáficas de Nikolauz da Cordilheira Oriental do Peru.
- **CAPÍTULO VI:** Sistema de Conduto Máfico-Ultramáfico das Intrusões de Nikolauz: Implicações para a Gênese de Sulfetos de Ni-Cu em Contexto Gondwânico da Cordilheira Oriental do Peru.
- **ANEXOS:** Ao final do manuscrito são apresentados anexos contendo tabelas com os resultados resumidos da geoquímica de rocha total e da geocronologia de zircões das unidades máfico-ultramáficas de Nikolauz. Manuscrito do trabalho "Geology and geochemistry of the Nikolauz mafic-ultramafic intrusions, Chinchao-Huánuco: evidence of a Ni-Cu sulfide mineralized conduit system in the orogenic Eastern Cordillera of the Peruvian Andes.

1.4. Vias de acesso

O Projeto Nikolauz está localizado no distrito de Chinchao, província e departamento de Huánuco, na região central dos Andes peruanos. A área situa-se a cerca de 76 km a leste da cidade de Huánuco por via rodoviária asfaltada, a 45 km ao sul da cidade de Tingo María e a aproximadamente 458 km ao nordeste da cidade de Lima. O alvo principal (Nikolauz) está centrado nas coordenadas UTM (WGS84, zona 18S): 8939535 N / 388185 E, com altitude média de 1396 metros.

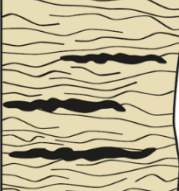
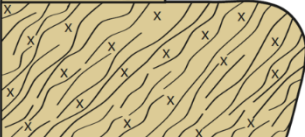
Chronology	Stratigraphy and lithological content		Units
Jurassic	Lower		<i>Pucara</i>
Triassic	Upper		
	Middle		<i>Mitu</i>
	Lower		
Devonian	Middle		<i>Younger Marañon</i>
	Lower		
Silurian	Upper		
Neoproterozoic			<i>Older Marañon</i>
			

Fig. 3. Coluna estratigráfica das sequências metamórficas do Complexo Marañón e das unidades sedimentares sobrejacentes (Grupos Mitu e Pucará). Figura elaborada a partir de dados estratigráficos e geológicos de Megard (1979) e considerando dados de zircões detriticos U-Pb de Chew et al. (2008).

Acesso à área do projeto

A partir do aeroporto de Huánuco, o acesso à área do Projeto Nikolauz realiza-se por estrada asfaltada em direção sudeste, com aproximadamente 1h30 de deslocamento. Após o primeiro dia de campanha, a cidade de Tingo María, situada a cerca de 45 km do alvo, constitui a base logística mais próxima, permitindo pernoites e deslocamentos diários à zona mineralizada. A região conta com hospedagens situadas próximas à entrada da rodovia de acesso.

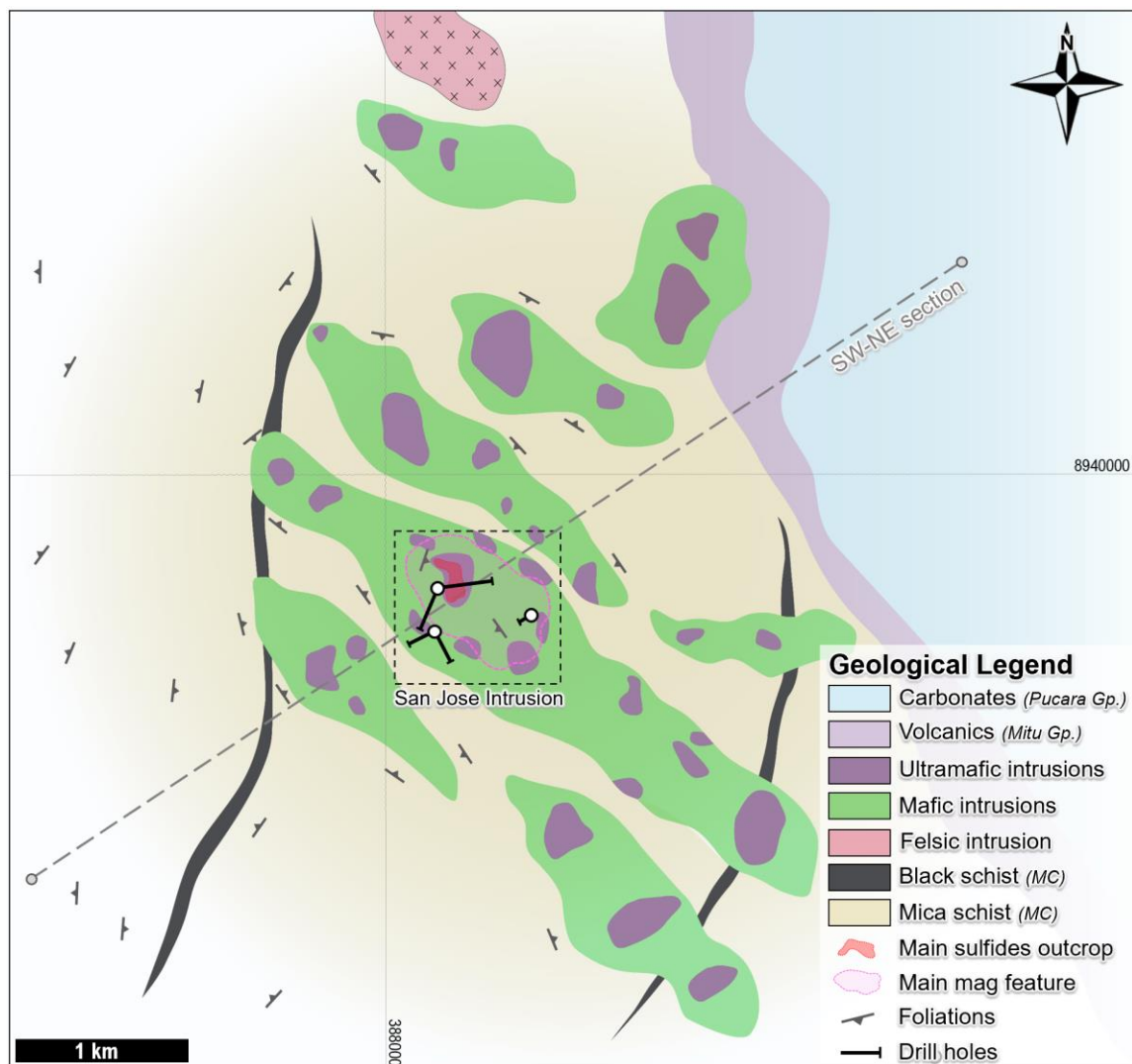


Fig. 4. Mapa geológico do Projeto Nikolauz. Destacam-se as intrusões máfico-ultramáficas que cortam as sequências do Complexo Marañón, apresentando geometria alongada na direção NW (paralela à foliação local) e discordante em relação à foliação regional de orientação NNE. A estratigrafia mais jovem é representada pelos vulcanitos do Grupo Mitu e pelos carbonatos da Formação Pucará, ambos em discordância (ver Figura 3).

1.5. Geologia Regional

1.5.1 Contexto Geológico da Cordilheira Oriental

A Cordilheira Oriental é composta principalmente por metassedimentos do Complexo Marañón (Fig. 1), um complexo metamórfico definido por Wilson e Reyes (1964) para descrever uma extensa sequência de rochas metamórficas na Cordilheira Oriental. O Complexo Marañón é recoberto por sequências estratigráficas do Paleozoico-Mesozoico e cortado por diversas intrusões pré-Jurássicas. A Cordilheira Oriental é subdividida em três zonas principais: norte,

central e sul. A zona norte se estende desde a localidade de Quivilla até a deflexão de Huancabamba, ao norte; a zona central cobre a região entre Huánuco e Ayacucho, enquanto a zona sul está localizada ao sul da deflexão de Abancay (Fig. 1).

A zona norte da Cordilheira Oriental é composta principalmente por metassedimentos neoproterozoicos de baixo a médio grau metamórfico, incluindo xistos quartzosos-micáceos, xistos grafitosos e filitos. Essas unidades foram afetadas pela orogenia famatiniana, com metamorfismo precoce próximo à deflexão de Huancabamba e metamorfismo tardio em direção ao sul (Chew et al., 2016). O componente ígneo inclui o cinturão intrusivo Balsas, Callangate e Pataz, predominantemente composto por granodioritos com hornblenda-biotita e, subordinadamente, granitos ricos em biotita, associados ao evento magmático Gondwânico Carbonífero-Permiano (Mišković, 2009). Na margem ocidental, entre Pataz e Quivilla, as intrusões Sitabamba-Pomabamba incluem pulsos granodioríticos ordovicianos que representam o evento magmático famatiniano. Essas intrusões foram posteriormente metamorfisadas em rochas gnáissicas durante o mesmo episódio tectônico (Chew et al., 2016).

A região central da Cordilheira Oriental é composta por metassedimentos do Neoproterozoico e do Paleozoico Inferior, incluindo xistos quartzosos-micáceos, xistos grafitosos, gnaisses e anfibolitos, com metamorfismo predominantemente de médio grau. Essas unidades foram afetadas por metamorfismo famatiniano tardio e gondwânico precoce, enquanto ao sul de Tarma, metassedimentos compostos por xistos quartzosos-micáceos e filitos foram metamorfisados durante a orogenia gondwânica tardia (Chew et al., 2016). O componente ígneo desta parte central, além de intrusões famatinianas e gondwânicas compostas por granitos e granodioritos, é dominado pelo Batólito San Ramón, de idade Permo-Triássica, composto por granodioritos a leucogranitos com feldspato megacristalino, intrudido em metassedimentos do Carbonífero Superior altamente deformados (Mišković et al., 2009). Na região de Tarma, também são preservadas unidades meso-neoproterozoicas, associadas a zonas estruturais em contato com essas intrusões, onde granitoides metamorfisados atingem condições gnáissicas.

A zona sul da Cordilheira Oriental é dominada por rochas sedimentares paleozoicas não metamorfisadas ou fracamente metamorfisadas. Metassedimentos do Complexo Marañón, incluindo xistos quartzosos-micáceos neoproterozoicos e gnaisses com metamorfismo famatiniano tardio, ocorrem apenas na região entre Ayacucho e Cusco. As intrusões ígneas incluem granitoides famatinianos e gondwânicos compostos por granodioritos e granitos, assim como os batólitos Cusco e Paucartambo, de idade Permo-Triássica, compostos por granitos com biotita e feldspato alcalino (Mišković, 2009). Na extensão meridional desse magmatismo, predominam granodioritos do Triássico Superior, monzogranitos de duas micas e leucogranitos com cordierita da Cordilheira de Carabaya. Mais ao sul, encontra-se o complexo intrusivo Allincapac, do Jurássico Inferior, composto por sienitos com nefelina e rochas vulcânicas peralcalinas (Mišković, 2009). Unidades meso-neoproterozoicas também são preservadas ao sul de Ayacucho, ocorrendo ao longo de limites estruturais em contato com intrusões Permo-Triássicas.

1.5.2. Geologia da Região Huánuco

1.5.2.1 Complexo Marañón

Um estudo geológico detalhado da região de Huánuco realizado por Cardona (2006) definiu duas unidades principais no Complexo Marañón: uma unidade gnáissica e uma unidade xistosa (Fig. 2). A unidade gnáissica aflora a leste da cidade de Huánuco e é composta por gnaisses com biotita-muscovita, além de um granitoide milonítico contendo porfiroblastos de feldspato. A unidade xistosa cobre uma porção significativa da Cordilheira Oriental na região de Huánuco e é composta por xistos micáceos com proporções variáveis de quartzo, muscovita, clorita, biotita e granada em menor quantidade. Uma coluna estratigráfica esquemática para a região de Huánuco, incluindo o Complexo Marañón e coberturas vulcano-sedimentares mais jovens, é apresentada na Figura 3.

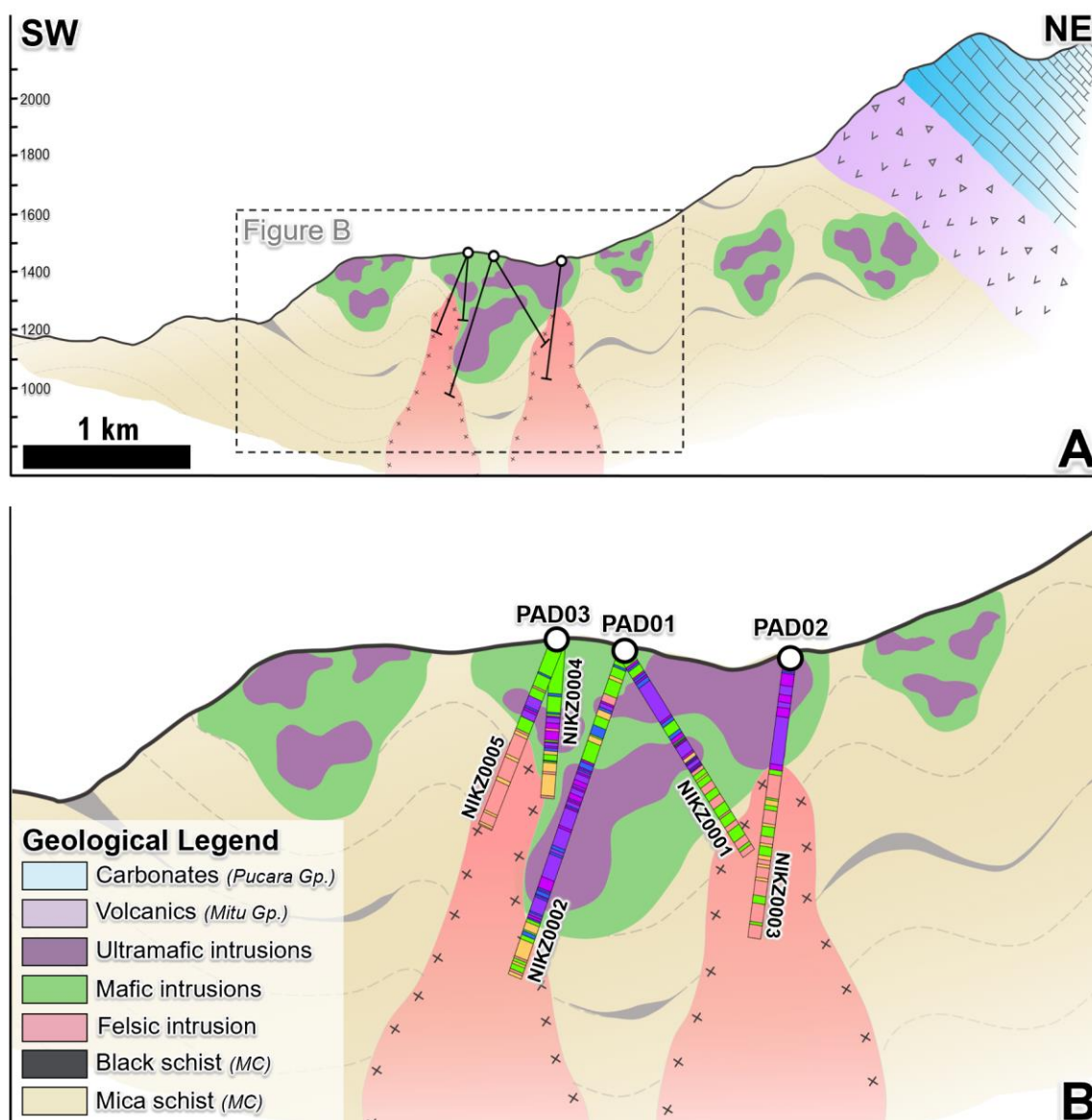


Fig. 5. Geologia do Projeto Nikolauz. (A) Seção geológica SW-NE. Os furos de sondagem exibidos na seção correspondem àqueles mostrados no mapa geológico. Os corpos máfico-ultramáficos não sondados na porção NE da seção são interpretados com base em projeções do mapa geológico e em levantamentos geofísicos. (B) Porção detalhada da seção geológica incluindo os perfis de sondagem. Modificado de relatórios internos da Rio Tinto.

O metamorfismo na porção ocidental da região de Huánuco é predominantemente de baixo grau, caracterizado por filitos e xistos com paragêneses típicas de fácies xisto-verde (Fig. 2). Em direção ao leste, o grau metamórfico aumenta progressivamente, atingindo condições de fácies epidoto-anfibolito. A estrutura deformacional e as foliações predominantes são concordantes tanto para as unidades gnáissica quanto xistosa. Mégard (1978) documentou quatro fases de deformação na região de Huánuco. A unidade

xistosa preserva remanescentes de uma foliação precoce Sn-1, incorporada na principal foliação Sn. Uma fase posterior (Sn+1) envolve a transposição parcial da foliação principal, mais evidente em faixas finas de mica e grafita, enquanto a fase final (Sn+2) está associada a dobras regionais. Segundo Cardona (2006), a principal deformação Sn e os remanescentes de Sn-1 pertencem ao mesmo regime deformacional, ocorrido durante a orogenia famatiniana.

Estudos sobre o metamorfismo do Complexo Marañón (Chew et al., 2005; Cardona, 2006) identificaram dois eventos metamórficos distintos: um durante o Ordoviciano Inferior (ca. 470 Ma, ~700 °C, ~12 kbar, associado à orogenia famatiniana) e outro durante o Pensilvaniano Médio (ca. 312 Ma, 4–10 kbar, 400–660 °C, vinculado à orogenia gondwânica). Estudos geocronológicos realizados por Cardona (2006) indicam idades magmáticas de 613 ± 35 Ma para os gnaisses de Huánuco, seguidas por um evento metamórfico datado em 484 ± 12 Ma. Análises U-Pb em zircões detríticos (Chew et al., 2008) identificaram dois episódios de sedimentação no Complexo Marañón: um durante o Neoproterozoico, correspondente ao “Marañón Antigo”, e outro durante o Siluriano-Devoniano, associado ao “Marañón Jovem” (Fig. 3).

1.5.2.2 Intrusões Máficas-ultramáficas

Quatro principais agrupamentos de corpos máfico-ultramáficos na região de Huánuco — Huancapallac, Churubamba, Tantamayo e Chinchao — foram reconhecidos por Granding e Zegarra (1979) (Fig. 2). Os corpos ultramáficos de orientação NO em Huancapallac são concordantes com a foliação dos xistos micáceos hospedeiros. Esses corpos, com até 2 km de comprimento e várias centenas de metros de largura, são compostos por dunito, peridotito e piroxenito, frequentemente com sulfetos primários disseminados (pirrotita, pentlandita e calcopirita) e sulfetos secundários (pirita, milerita, bravoíta e violarita).

Os corpos de Churubamba consistem em pequenos corpos de dunito serpentizado (< 900 m de comprimento) orientados em direção NO. Os corpos de Tantamayo, também de orientação NO, são concordantes com as unidades xistosas hospedeiras. Consistem em diversos corpos ultramáficos, incluindo

intrusões tabulares do tipo soleira com até 200 metros de espessura, compostas por dunito, peridotito e piroxenito, aflorando nas proximidades das lagoas Carpa e Huaquin.

Em Chinchao, Guillon e Zegarra (1977) descreveram dois corpos intrusivos principais: a intrusão San Luis e os corpos San José, sendo estes últimos referidos neste estudo como as intrusões Nikolauz. Essas intrusões máfico-ultramáficas estão localizadas em um setor estrutural onde o sistema regional NNO (limite oriental da bacia da Cordilheira Oriental dos Andes peruanos) intercepta sistemas de falhas transandinas orientadas em direção ENE.

O corpo de San Luis, com direção NE, é composto por dunito serpentinizado portador de sulfetos (pentlandita e calcopirita), bordejado por rochas gabroicas. As intrusões Nikolauz são controladas por sistemas transandinos sinistrais de orientação ENE e se apresentam como intrusões alongadas de direção NO, possivelmente associadas a estruturas antitéticas do sistema maior (Fig. 2). Essas estruturas magmáticas orientadas para NO se estendem por até 4 quilômetros de comprimento, com mergulhos íngremes interpretados em direção sudoeste. As intrusões foram colocadas como corpos do tipo soleira dentro das encaixantes xistosas concordantes.

As intrusões máfico-ultramáficas de Nikolauz são compostas por dunito, peridotito, piroxenito e rochas gabroicas com diferentes graus de alteração. As rochas mais primitivas encontram-se amplamente serpentinizadas e hospedam os sulfetos magmáticos de Ni-Cu do Projeto Nikolauz.

1.5.2.3 Grupos Mitu e Pucará

O Complexo Marañón é recoberto por unidades vulcânicas e sedimentares mais jovens pertencentes aos Grupos Mitu e Pucará (Fig. 3). O Grupo Mitu foi definido por Mc Laughlin (1924) para descrever uma espessa sequência de arenitos continentais intercalados com fluxos vulcânicos máficos. Spikings et al. (2016) descrevem o Grupo Mitu como uma série de fluxos de lava alcalina intercalados com sedimentos fluviais-aluviais oxidados, depositados em ambiente continental,

acompanhados por algumas intrusões peraluminosas. A sedimentação clástica é composta por conglomerados, arenitos e folhelhos, nos quais a maioria dos clastos conglomeráticos tem origem em lavas retrabalhadas do próprio Grupo Mitu.

As rochas vulcânicas consistem em lavas basálticas a andesíticas com textura traquítica, contendo fenocristais centimétricos de plagioclásio, piroxênios e, ocasionalmente, cristais de olivina. Idades U-Pb concordantes obtidas em zircões de fácies vulcânicas, juntamente com idades de zircões detríticos, sugerem um intervalo entre 245–220 Ma para o vulcanismo e a sedimentação do Grupo Mitu (Spikings et al., 2016). A base do Grupo Mitu é marcada por uma discordância angular sobre rochas neoproterozoicas-paleozoicas do Complexo Marañón, enquanto o limite superior é um contato concordante com as rochas calcárias do Grupo Pucará (Rosas et al., 2007).

A sequência sedimentar do Grupo Pucará consiste predominantemente em calcários intercalados com camadas de rochas dolomíticas e folhelhos negros (Fig. 3).

1.5.3. Contexto tectônico da Cordilheira Oriental

A sequência estratigráfica da Cordilheira Oriental peruana (Fig. 1) foi depositada sobre os terrenos Amazônico e Paracas-Arequipa, que constituem um embasamento cristalino consolidado por sucessivos processos de acreção e amalgamação crustal em distintos eventos orogênicos. De acordo com dados geocronológicos, esse embasamento registra duas grandes orogenias pré-sedimentares: a Mesoproterozoica (1325–930 Ma) e a Neoproterozoica (850–635 Ma), ambas fundamentais para a estabilização inicial da crosta continental na margem ocidental de Gondwana. Durante o Paleozoico, desenvolveram-se ainda duas orogenias sincrônicas à sedimentação e intimamente associadas à deformação e ao metamorfismo das sequências do Marañón: a Orogenia Famatiniana (575–415 Ma), relacionada a eventos colisivos e retrabalhamento crustal, e a Orogenia Gondwânica (380–275 Ma), vinculada a um regime subducional ativo ortogonal.



Fig. 6. (A) Vista panorâmica a partir do local do furo de sondagem PAD01 em direção ao NE. A foto mostra a parte superior do Complexo Marañón Jovem em contato discordante com as unidades sobrejacentes dos Grupos Mitu e Pucará ao fundo. (B–G) Fotos e fotomicrografias de rochas xistosas do Complexo Marañón. (B) Afloramento de quartzito-mica xisto com foliação proeminente mergulhando para SW. (C–D) Quartzito-mica xisto variavelmente dobrado. (E) Afloramento de quartzito-mica xisto cinza-escuro com grafita. (F) Fotomicrografia de quartzito-mica xisto com “mica fish” e microestruturas S-C. (G) Porfiroblasto euédrico tardio-cinemático de granada em quartzito-mica xisto.

1.5.3.1. Mesoproterozóico (1325 – 930 Ma)

O principal e mais antigo evento tectônico registrado na Cordilheira Oriental é a orogenia Sunsás, que representa a colisão entre os blocos Laurentia e Amazônia no Mesoproterozoico (Ramos, 2008; Chew, 2007; Loewy et al., 2004). Zircões detríticos analisados por Chew et al. (2007) mostram a idade mais antiga da Cordilheira Oriental chegando a 2600 Ma, alguns zircões esporádicos em torno de ~1650 Ma, e ausência de zircões até 1325 Ma. A maior população de zircões está entre 1325 e 930 Ma, com pico em 1120 Ma. Os granitos de Querobamba,

no sul do Peru, apresentam idades concordantes de 1123 ± 12 Ma com altos teores de U, o que indicaria o emplazamento pós-metamórfico (Mišković et al., 2009). A assinatura peraluminosa, cálcio-alcalina a alcalina-cálcica, altos teores de SiO_2 e anomalias negativas uniformes de Nb-Ta dos granitoides indicam características de subducção (tipo I) nesse evento mesoproterozoico.

1.5.3.1. Neoproterozóico (850 – 635 Ma)

Após uma pausa tectônica de cerca de 80 Ma, evidenciada pela ausência de zircões entre 930 – 850 Ma, ocorre uma nova orogenia relacionada à fragmentação de Rodínia, com a abertura do oceano Lapetus e a união dos crátons de Arequipa e Amazônia, deixando como vestígio uma sutura crustal (Mišković et al., 2009; Chew et al., 2007). A assinatura alcalina/alcalina-cálcica, metaluminosa e os altos teores de K-LILE e HFSE dos monzonitos quartzosos e granitos com feldspato alcalino (752–691 Ma) indicam magmatismo tipo A no sul da Cordilheira Oriental (Mišković et al., 2009). Já na parte centro-sul, foram descritas unidades ultramáficas de Tapo com idades Sm-Nd de 720 Ma (Tassinari et al., 2011). Após essa orogenia, registra-se um processo de rifteamento associado à separação parcial do bloco Arequipa–Antofalla por volta de 635 Ma, o que teria permitido a formação de uma bacia onde se desenvolveram as sedimentações iniciais da sequência Marañón. A ausência de zircões em torno de 600 Ma sugere um período de relaxamento tectônico, provavelmente relacionado a eventos extensivos do Neoproterozoico Tardio associados à sedimentação da sequência Marañón Inicial.

1.5.3.1. Famatiniano (575 – 415 Ma)

No final do Pré-Cambriano e início do Paleozoico (575–480 Ma), ocorre a colisão entre os blocos Paracas-Arequipa-Antofalla e Amazônia (Mišković et al., 2009). Inicialmente, registra-se um evento metamórfico de alto grau por volta de 480 Ma (Chew et al., 2016), que, com a diminuição da compressão, favoreceu o desenvolvimento magmático em ambiente de subducção durante o Ordoviciano Inferior (474 – 442 Ma). Esse magmatismo tipo I se estende do norte da Argentina até a Colômbia e Venezuela (Mišković et al., 2009; Chew et al., 2007).

Granitoides com feldspato alcalino de características pós-colisionais foram reconhecidos no Peru (Chew et al., 2008). No Siluriano, também são relatados zircões metamórficos com idades de 435 Ma (Chew et al., 2016). A baixa população de zircões entre 415 e 385 Ma indica um intervalo de relaxamento tectônico, durante o qual se desenvolveu a arquitetura extensional onde provavelmente foi depositada a sequência sedimentar Marañón Tardia no início do Devoniano.

1.5.3.1. Gondwânico (380 – 275 Ma)

Durante o Devoniano Médio, inicia-se uma subducção ortogonal com aumento progressivo da componente compressiva até o final do Carbonífero Inferior (Mišković et al., 2009). No norte da Cordilheira Oriental, desenvolve-se o arco responsável pelo magmatismo tipo I cálcio-alcálico do Batólito de Patáz (342–332 Ma) (Wiemer et al., 2021; Chew et al., 2016; Witt et al., 2013), cujo magmatismo se estende até o sul da Cordilheira. No distrito de Patáz, ocorrem eventos transpressivos com mineralizações de Au-Fe-Zn-Pb datadas em 331.9 Ma e 322.6 Ma (Wiemer et al., 2021). Cardona et al. (2006) relatam metamorfismo de alto grau restrito aos migmatitos, enquanto a faixa xistosa adjacente apresenta metamorfismo de baixo grau com idades entre 315–312 Ma (Gondwânico Inicial). Essa tectônica corresponde à orogenia anterior à consolidação final de Pangeia.

1.5.3.1. Permo-Triássico e Triássico-Jurássico (270 – 170 Ma)

Após o episódio compressivo, instalou-se um regime extensional regional entre o Permiano e o início do Jurássico, provocando afinamento litosférico. Esse processo gerou vulcanismo bimodal intercalado com arenitos e folhelhos vermelhos do Grupo Mitu (245–220 Ma; Spikings et al., 2016) e corpos granitoides tipo S como os de San Ramón–La Merced. No final do Triássico, ao sul da Cordilheira de Carabaya, intrudiram granitoides peraluminosos associados a basaltos alcalinos e xoxonitos da bacia de Cuzco. No Jurássico Inferior iniciou-se o evento andino, com subducção ativa ortogonal e formação de arco magmático costeiro, colocando a Cordilheira Oriental em retroarco.

CAPÍTULO II: Materiais, Técnicas de Amostragem e Procedimentos Analíticos Aplicados

2.1. Dados de Campo Geológico

O mapa geológico e a seção geológica do Projeto Nikolauz (Ni-Cu) foram elaborados com base em dados de exploração fornecidos pela empresa Rio Tinto, no departamento de Huánuco, Peru. Esses dados incluem mapas geológicos de exploração, interpretações geoquímicas de solos em áreas com afloramentos limitados e levantamentos geofísicos de alta resolução. A seção geológica foi interpretada por meio da integração de mapeamento geológico de superfície, medições estruturais (foliações), registros de sondagens e informações complementares do Serviço Geológico do Peru (Geocatmin–Ingemmet).

Foram utilizados registros detalhados de cinco sondagens localizadas na parte central da intrusão de Nikolauz (setor San José), contendo descrições litológicas, estruturais e mineralógicas, complementadas com dados geoquímicos de rocha total. A sondagem NIKZ0001, analisada especificamente neste estudo, foi submetida a um registro químico-estratigráfico detalhado e a observações petrográficas sistemáticas.

2.2. Estudos Petrográficos

Foi realizado um estudo petrográfico detalhado em 34 lâminas delgadas polidas, representando litologias características e zonas com mineralização de sulfetos. As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia da Universidade de Brasília (UnB), Brasil. Utilizou-se microscopia de luz transmitida e refletida para caracterizar associações minerais principais e opacas, texturas magmáticas e relações entre silicatos e sulfetos. A coleção analisada inclui 12 amostras de dunitos–peridotitos, 2 de piroxenitos, 16 de gabros, 3 de xistos e 1 de granitoide, permitindo reconstruir a evolução das fácies magmáticas e identificar texturas associadas à mineralização.

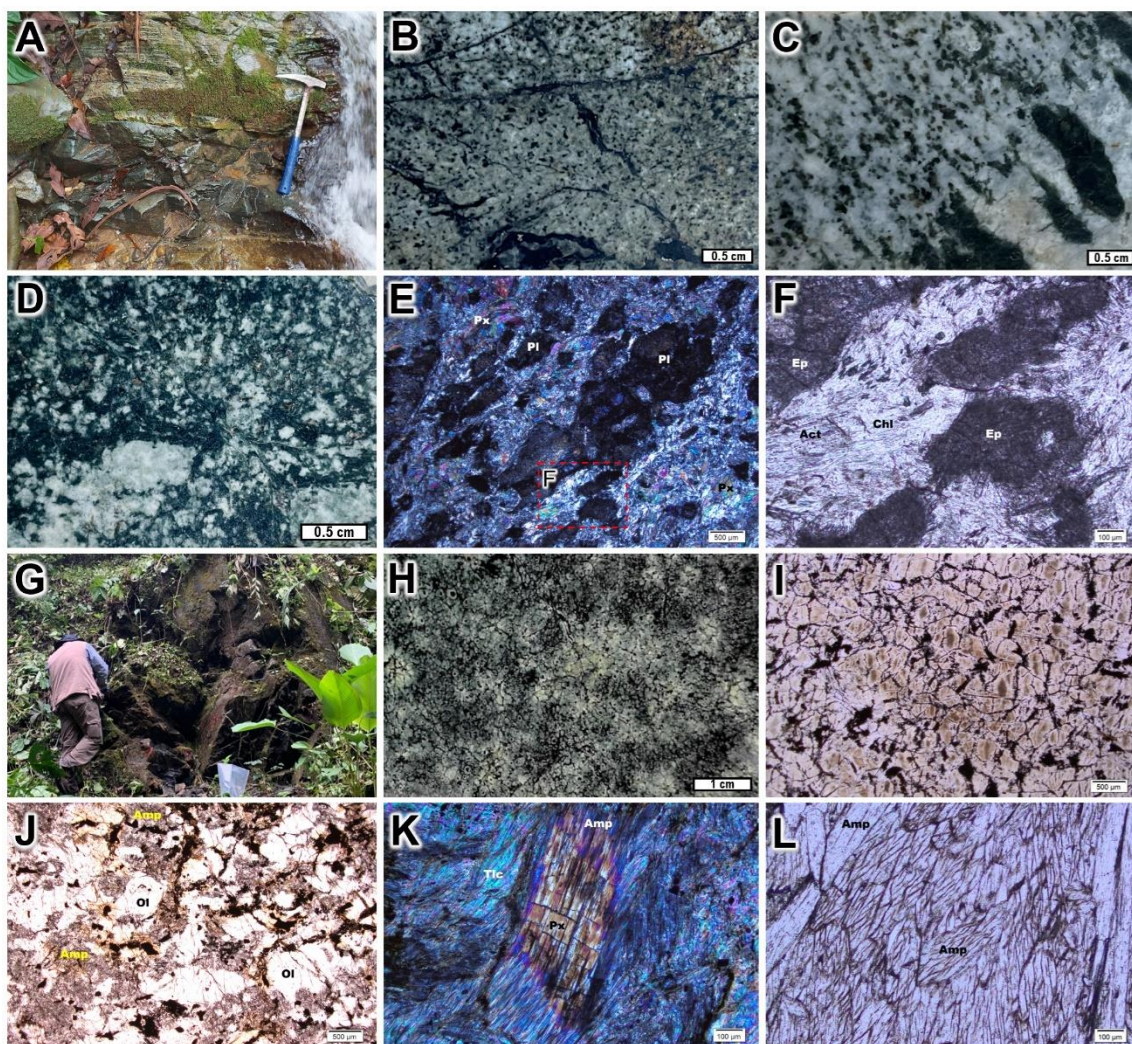


Fig.7. Fotos e fotomicrografias de rochas máfico-ultramáficas. (A) Afloramento de rocha gabroica bandada. (B) Rocha gabroica de granulação média com plagioclásio (Pl) tabular esbranquiçado e pseudomorfos anédricos pretos de piroxênio (Cpx). (C) Rocha gabroica de textura variável composta por piroxênio prismático alongado e Pl tabular com tamanho de grão distinto. (D) Rocha gabroica de textura variável com granulação heterogênea e pseudomorfos anédricos pretos de Cpx. (E–F) Fotomicrografias de rocha gabroica mostrando Pl e pseudomorfos de Cpx; o retângulo tracejado em (E) é detalhado em (F). Pl é substituído por um agregado fino de epidoto (Ep) abundante, enquanto Cpx é substituído por actinolita (Act) e clorita (Chl). (G) Afloramento de dunito maciço (serpentinitito). (H) Dunito adcumulate com pseudomorfos de olivina (Ol) substituídos por serpentina e minerais opacos subordinados. (I) Fotomicrografia de dunito cumulático. Ol é substituído por serpentina (faixas esbranquiçadas) e magnetita (veios negros irregulares ao longo de fraturas). Pseudomorfos de cromita (Chr) ocorrem como cristais opacos subédricos. (J) Fotomicrografia de uma peridotita (tremolita–serpentinitito) com pseudomorfos de Ol em um agregado fino de tremolita (Amp), talco (Tlc) subordinado e Chl. Minerais opacos incluem magnetita e Chr. (K) Fotomicrografia de um piroxenito mostrando um relicto de Cpx em um agregado de Amp e Tlc subordinado. (L) Fotomicrografia de um piroxenito (tremolitito), composto por Amp de granulação fina a média.

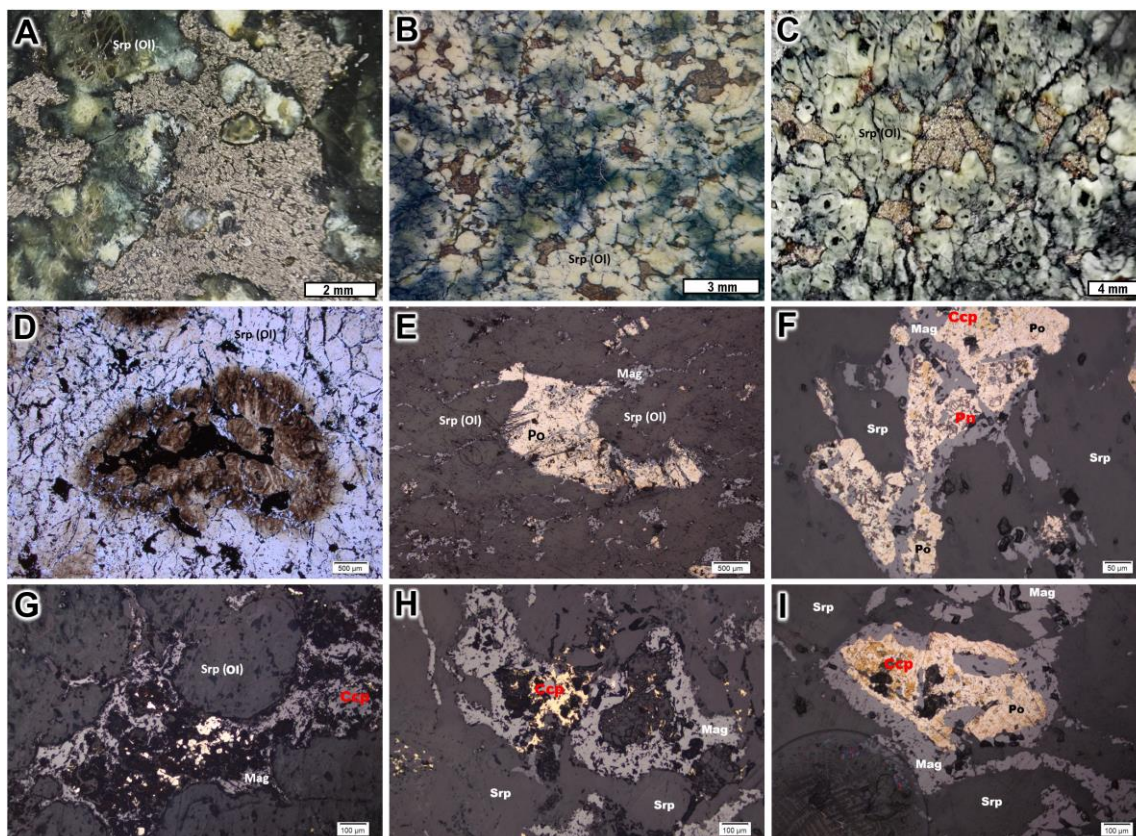


Fig. 8. Fotos e fotomicrografias de mineralização sulfetada. (A) Mineralização sulfetada de textura em rede em dunito. Os pseudomorfos de olivina estão parcial ou completamente englobados por sulfetos. (B–C) Glóbulos de sulfetos intersticiais a pseudomorfos de olivina. Observa-se um halo de alteração esbranquiçado nos pseudomorfos de olivina adjacentes aos glóbulos de sulfetos. (D) Fotomicrografia mostrando um halo de alteração amarronzado desenvolvido ao redor dos glóbulos de sulfetos no dunito hospedeiro. (E–F) Fotomicrografias de glóbulos de sulfetos; os sulfetos consistem em pirrotita (Po) e, subordinadamente, pentlandita (Pn) e calcopirita (Ccp). Nota-se a alteração parcial dos sulfetos para magnetita (Mag). (G–I) Fotomicrografias de glóbulos de sulfetos variavelmente alterados para magnetita e hidróxidos de Fe. Os sulfetos consistem principalmente em pirrotita (Po) com pequena proporção de calcopirita (Ccp).

2.3. Análises Geoquímicas de rocha total

Este estudo incorpora um total de 553 análises geoquímicas de rocha total, das quais 454 amostras de testemunhos de sondagem foram coletadas de forma contínua a intervalos de 2 a 3 metros (dependendo de mudanças litológicas ou mineralógicas), com peso médio de 2 kg por amostra, e 99 amostras de afloramento provenientes de rochas máfico-ultramáficas da intrusão de Nikolauz. Todas as análises foram realizadas nos laboratórios da ALS Global.

Os óxidos maiores, elementos traço e terras raras (REE) foram determinados por fusão com metaborato de lítio seguida de detecção por ICP-AES/MS. Elementos como Se, Te e Bi foram analisados após digestão com água régia utilizando ICP-MS, enquanto Pd, Pt e Au foram determinados por fusão via ensaio ao fogo e analisados por ICP-AES

2.4. Separação de zircões e preparação das amostras

Aproximadamente 12 kg de rocha por amostra foram processados para a extração de zircões no Laboratório de Geocronologia da Rio Tinto, em Tasmânia. As amostras foram britadas e moídas com equipamentos de carboneto de tungstênio e peneiradas para reter as frações de 63–125 µm e 164–212 µm. A separação mineralógica foi realizada de forma sequencial, utilizando mesa Wilfley, separador magnético Frantz e líquidos densos. As frações concentradas também passaram por separação gravimétrica antes da purificação final por seleção manual sob microscópio binocular. Os grãos selecionados foram montados em epóxi, polidos e limpos com HNO₃ a 3%. Embora não tenham sido obtidas imagens por catodoluminescência (CL), imagens por elétrons retroespalhados (BSE) foram utilizadas para identificar zonamentos internos e definir os pontos de análise.

2.5. Análises por microsonda eletrônica

As análises por microsonda eletrônica foram realizadas exclusivamente no Laboratório de Geocronologia da Rio Tinto, em Tasmânia, utilizando um equipamento JEOL JXA-8230. As condições analíticas incluíram 15 kV de voltagem, 10 nA de corrente e diâmetro do feixe entre 1–5 µm, com tempos de contagem de 10 s no pico e 5 s no fundo. Foram utilizadas amostras padrão naturais e sintéticas, incluindo albita, wollastonita e vanadinita. Foram analisadas plagioclases e anfibólios provenientes de cinco amostras representativas.

2.6. Geocronologia U–Pb em zircão

As análises U–Pb em zircão foram realizadas no mesmo laboratório, utilizando um ICP-MS Thermo Element XR acoplado a um laser excimer de 193 nm. A

ablação foi realizada com spot de 25 μm , frequência de 20 Hz e fluência de 2,0 J/cm². Cada análise consistiu em 10 s de background e 20 s de aquisição de sinal. O processamento dos dados foi feito com o software Lolite 4.0, utilizando a interface VizualAge. O zircão GJ-1 foi empregado como padrão primário (Jackson et al., 2004), enquanto 91500 e Plešovice foram utilizados como padrões secundários. Não foi aplicada correção para Pb comum. As idades finais incluem uma incerteza sistemática propagada de 1%.

2.7. Análise de elementos traço em zircão

As análises de elementos traço também foram conduzidas no Laboratório de Geocronologia da Rio Tinto, na mesma sessão analítica das análises U–Pb. Utilizou-se um spot de 35 μm , frequência de 20 Hz e fluência de 4.0 J/cm². Foram medidos elementos principais e traço (e.g., Si, Ti, Nb, Th, U, ETRs, Hf, Y, Pb). Cada ponto foi ablado por 30 s, com 10 s de background. A calibração foi realizada com vidro NIST-610, com controle de precisão e exatidão usando NIST-612, apatita Durango e monazita Diamantina. A redução dos dados foi feita com o software Lolite 4.0, utilizando SiO₂ como padrão interno para zircão. A precisão analítica foi geralmente melhor que 5%.

CAPÍTULO III: Características magmáticas e registro petrográfico das intrusões máfico-ultramáficas do Projeto Nikolauz: evidências de mineralização de Ni-Cu na Cordilheira Oriental do Peru

As intrusões máfico-ultramáficas são predominantemente hospedadas em xistos de quartzo-mica do Complexo Marañón, formando um conjunto de corpos alongados, em grande parte concordantes com a foliação principal das rochas hospedeiras (Fig. 4, 5). O Complexo Marañón e as intrusões máfico-ultramáficas são recobertos de forma discordante por sequências vulcânicas mais jovens e sedimentos imaturos do Grupo Mitu, além de rochas carbonáticas do Grupo Pucará (Fig. 4, 5 e 6A). As intrusões máfico-ultramáficas alcançam até 4 km de comprimento e 1 km de largura, consistindo principalmente de rochas gabroicas intimamente associadas a domínios ultramáficos irregulares. Granitoides de composições variadas cortam tanto o Complexo Marañón quanto as intrusões máfico-ultramáficas (Fig. 4, 5). As descrições a seguir apresentam as principais características geológicas e petrográficas das rochas hospedeiras, dos corpos máfico-ultramáficos e dos granitoides mais jovens.

3.1. Rochas encaixantes

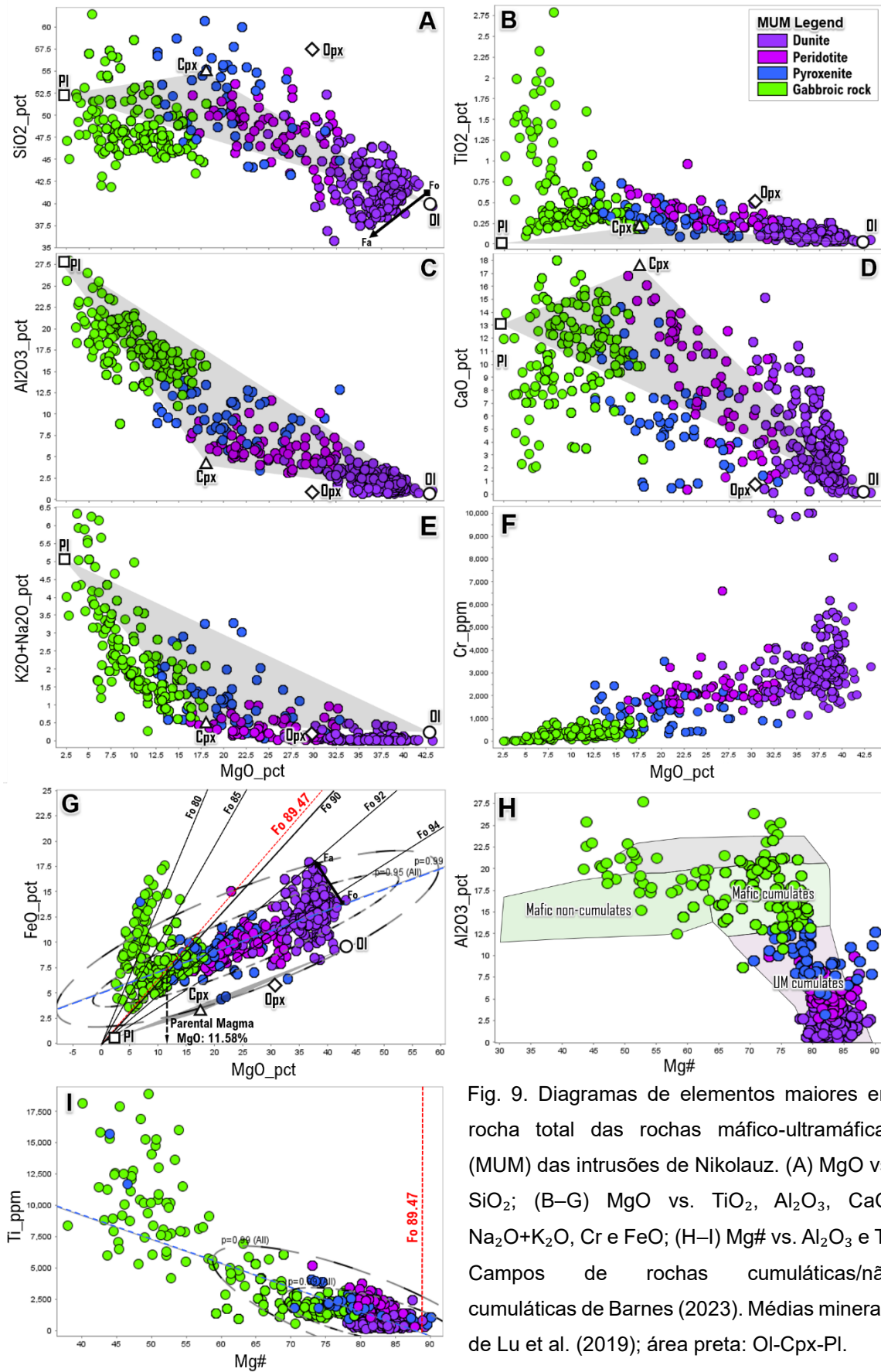
As rochas encaixantes pertencem à zona inferior do Complexo Marañón mais Jovem (Fig. 3) e consistem em xistos de quartzo-mica com lentes intercaladas portadoras de grafita (Fig. 4, 5). Os xistos de quartzo-mica são rochas foliadas (Fig. 6B-C-D), compostas principalmente por quartzo (55–65%) e muscovita (20–30%), menores quantidades de clorita (5–8%), biotita (2–3%) e plagioclásio (2–3%), além de turmalina, rutilo, zircão e óxidos de Fe-Ti como minerais acessórios comuns. Predominam os xistos de granulação fina com textura lepidoblástica, mas também ocorrem rochas com muscovita grossa e/ou porfiroblastos de granada em matriz de granulação fina (Fig. 6F-G). As rochas com grafita ocorrem como xistos de quartzo-mica distintamente mais escuros (xisto negro), caracterizados por grafita disseminada de granulação fina (Fig. 6E). A foliação nas rochas encaixantes é comumente dobrada (Fig. 6C-D) e pode apresentar “mica fish” e microestruturas S-C (Fig. 6F). Granada ocorre como porfiroblastos euédricos cinemáticos tardios, cortando a foliação (Fig. 6G). A foliação principal (Sn) das rochas xistosas segue predominantemente a

tendência regional NNE da área, mas foliação NW predomina próxima às intrusões máfico-ultramáficas (Fig. 5). A foliação NW das rochas encaixantes é concordante com o alongamento dos corpos máfico-ultramáficos, assim como com os eixos de dobra descritos em afloramentos próximos à intrusão, sugerindo que o alojamento das intrusões perturbou as estruturas regionais. As rochas encaixantes na zona de contato são caracterizadas por um intercepto de alguns metros de espessura, com aumento progressivo em minerais máficos em direção à intrusão, sugerindo assimilação parcial e/ou recristalização das rochas encaixantes pelas intrusões máfico-ultramáficas. A composição das rochas encaixantes caracteriza protólitos sedimentares constituídos principalmente por folhelhos e subordinadamente por folhelhos negros, consistentes com as zonas inferiores do Complexo Marañón mais jovem (Fig. 3). A paragênese metamórfica das rochas encaixantes inclui clorita-biotita-granada-plagioclásio-quartzo-muscovita, indicando metamorfismo na transição entre as fácies xisto-verde e anfibolito.

3.2. Granitoides

Dois tipos distintos de intrusões félsicas foram reconhecidos durante o mapeamento nas proximidades das intrusões MUM de Nikolauz. Um grupo de granitoides que cortam as rochas encaixantes e os corpos máfico-ultramáficos apresenta composições variando de granodiorito a monzogranito. Esses granitoides ocorrem em afloramentos de até dezenas de metros de tamanho e também foram interceptados em furos de sondagem (Fig. 5). Predominam texturas faneríticas equigranulares, mas são comuns veios pegmatíticos com alguns metros de espessura contendo turmalina e biotita como minerais acessórios.

Um segundo tipo de granitoide, com composições variando de sienogranito a granito alcalifeldspático, foi mapeado na porção mais ao norte da área estudada (Fig. 4). Esse granitoide apresenta comumente textura porfirítica, composta por cristais grossos de feldspato potássico em matriz de granulação média de quartzo-plagioclásio-biotita, com apatita, zircão e ilmenita como minerais acessórios.



3.3. Intrusões máfico-ultramáficas

São corpos alongados em escala de quilômetros, compostos por rochas gabroicas com vários domínios dispersos (< 500 m de comprimento) de rochas ultramáficas (Fig. 4). Essas intrusões ocorrem predominantemente como blocos e matacões, com afloramentos raros, mas as descrições de testemunhos de sondagem forneceram restrições adicionais para suas estruturas e composições. Embora as intrusões máfico-ultramáficas preservem comumente texturas magmáticas primárias, a mineralogia magmática encontra-se intensamente alterada, sendo composta por pseudomorfos de olivina, piroxênio e plagioclásio. Devido a essa alteração penetrante, as rochas ígneas são amplamente classificadas com base em suas texturas e na proporção relativa de pseudomorfos, em dunito, peridotito, piroxenito e rochas gabroicas.

As rochas gabroicas são principalmente maciças, com domínios acamadados subordinados caracterizados por quantidades variáveis de minerais máficos e félsicos em escala centimétrica a métrica (Fig. 7A). Domínios variavelmente foliados, com foliação principal predominantemente concordante ou sub-concordante ao bandamento, são comuns. As rochas gabroicas consistem principalmente em pseudomorfos de plagioclásio e piroxênio de granulação média (Fig. 7B), com ocorrência frequente de rochas de textura variada, marcadas por domínios irregulares onde se desenvolvem pseudomorfos de granulação grossa (Fig. 7C-D). Os pseudomorfos de plagioclásio ocorrem como agregados de granulação fina compostos principalmente por clinozoisita, albita e mica branca, enquanto os pseudomorfos de piroxênio são formados por agregados de granulação fina a média de actinolita, clorita e epídoto (Fig. 7E-F). Minerais ígneos primários são raramente preservados, ocorrendo apenas como núcleos residuais em cristais de plagioclásio. Os minerais acessórios das rochas gabroicas incluem ilmenita, titanita, apatita, quartzo e sulfetos (principalmente pirita e calcopirita).

As rochas ultramáficas afloram principalmente como serpentinitos maciços e altamente magnéticos, resultantes da alteração penetrante de dunito adcumulate (Fig. 7G), associados a menores volumes de serpentinitos

tremolíticos (derivados de peridotito) e tremolititos (derivados de piroxenito). O contato entre as rochas máficas e ultramáficas é observado apenas em testemunhos de sondagem, geralmente exibindo-se como uma estreita zona de transição (com até poucos metros de espessura) de peridotito, piroxenito e/ou rochas melagabroicas entre o dunito adcumulate e as rochas gabroicas. A diferenciação dos corpos ultramáficos no contato com os domínios gabroicos indica que múltiplos corpos ultramáficos cortam as intrusões gabroicas predominantes.

O dunito apresenta textura adcumulate de granulação média, formada por pseudomorfos de olivina substituídos por serpentina e magnetita (Fig. 7H-I). Minerais acessórios incluem pseudomorfos finos de cromita substituídos por magnetita e ferricromita, além de quantidades variáveis de carbonato, tremolita, clorita, talco e sulfetos. Carbonato e clorita são comuns como venulações que cortam a textura adcumulate. Sulfetos com textura intersticial a matricial são frequentes no dunito e serão descritos no tópico seguinte.

O peridotito é composto por pseudomorfos de olivina em uma matriz de granulação fina de tremolita, associada a quantidades variáveis de talco, magnetita, carbonato e clorita (Fig. 7J), sugerindo cumulos de olivina com quantidades variáveis de piroxênio intercumulus (meso- a ortocumulos) e/ou cumulos de olivina + piroxênio. O peridotito também apresenta pseudomorfos finos de cromita extensivamente substituídos por magnetita e ferricromita.

O piroxenito consiste em pseudomorfos de piroxênio de granulação média a grossa, substituídos por agregados de tremolita de granulação fina a média e menor quantidade de talco (Fig. 7K-L). Alguns relictos de clinopiroxênio parcialmente preservados ocorrem em algumas amostras (Fig. 7K).

3.4. Mineralização em sulfetos

O programa de sondagem realizado pela Rio Tinto teve como alvo anomalias geoquímicas e geofísicas associadas a ocorrências de sulfetos de Ni-Cu em dunito. Diversas zonas mineralizadas em sulfetos, com até 40 metros de

espessura, foram interceptadas dentro das rochas ultramáficas, contendo até 0.35% Ni e 0.14% Cu, além de outras áreas menores e localizadas em escala centimétrica que atingem 1.2% Ni e 1.0% Cu.

A mineralização sulfetada ocorre predominantemente no dunito e inclui sulfetos disseminados, intersticiais e com textura em rede, além de domínios subordinados com venulações de sulfetos. Os sulfetos em rede (Fig. 8A) e os blebs intersticiais de sulfeto (Fig. 8B-C) predominam, consistindo em sulfetos que envolvem ou se alojam intersticialmente aos pseudomorfos de olivina. Embora os minerais magmáticos primários tenham sido intensamente alterados, texturas típicas de sulfetos magmáticos (e.g., Barnes et al., 2017, 2018) são preservadas, incluindo olivina subeuédrica com faces arredondadas e/ou inclusões ou entalhes de corrosão preenchidos por sulfetos (Fig. 8A).

Comumente desenvolve-se um halo de alteração ao redor dos blebs de sulfeto no dunito hospedeiro, possivelmente resultado da alteração dos sulfetos durante a serpentinização do dunito hospedeiro (Fig. 8D). A associação de sulfetos é composta principalmente por pirrotita (> 90%) e menores quantidades de pentlandita e calcopirita associadas (Fig. 8E-F). Os sulfetos encontram-se variavelmente alterados em agregados de magnetita e hidróxidos de ferro (Fig. 8G-I), incluindo blebs de sulfetos intensamente alterados, onde os sulfetos magmáticos foram completamente substituídos por magnetita, hidróxidos de ferro e minerais secundários portadores de Ni (e.g., violarita, heazlewoodita).

CAPÍTULO IV: Geoquímica de elementos maiores e traço: zonamento máfico-ultramáfico, distribuição de elementos calcófilos e implicações petrogenéticas

4.1. Elementos maiores y menores

As concentrações de elementos maiores nas rochas máfico-ultramáficas de Nikolauz são controladas principalmente pela proporção de olivina, piroxênio e plagioclásio, como ilustrado em seus diagramas binários (Fig. 9). Nesses diagramas, os teores de elementos maiores foram normalizados a 100% em base livre de perda ao fogo (LOI-free) para reduzir os efeitos da alteração, permitindo sua comparação com amostras de intrusões não alteradas. As composições de elementos maiores são consistentes com as descrições petrográficas que caracterizaram rochas cumuláticas compostas por proporções variáveis de olivina, piroxênio e plagioclásio extensivamente alterados (i.e., dunito, peridotito, piroxenito, rochas gabroicas). As rochas gabroicas cumuláticas podem ser distinguidas de rochas não cumuláticas mineralogicamente semelhantes (e.g., diques máficos) por seu Mg# mais elevado (Fig. 9H). A abundância de amostras com altos teores de MgO (> 35% e até 43% em peso) e Cr (> 2500 ppm e até 1% em peso) (Fig. 9F) indica que o dunito (cumulato de olivina + cromita) é a rocha ultramáfica predominante nas intrusões de Nikolauz. Além disso, os altos teores de CaO das rochas ultramáficas (Fig. 9D) corroboram as evidências petrográficas de que o Cpx é o piroxênio predominante (Fig. 7K-L). Teores altamente variáveis de TiO₂ em rochas gabroicas, geralmente < 0.25% em peso, mas podendo atingir até 2.75% (Fig. 9B), são consistentes com a ocorrência de óxidos acessórios de Fe-Ti nos cumulos de plagioclásio + piroxênio mais fracionados. Rochas gabroicas com maiores teores de TiO₂ apresentam Mg# mais baixo e se posicionam principalmente no campo de rochas máficas não cumuláticas (Fig. 9H).

A caracterização dos magmas parentais das intrusões máfico-ultramáficas fornece pistas sobre a natureza da fonte mantélica e sobre os processos que podem levar à origem de depósitos minerais. A composição de magmas parentais pode ser determinada a partir de bordas resfriadas, diques alimentadores associados ou modelagens baseadas em análises combinadas de rocha total e composições de olivina, como ilustrado em vários estudos (e.g.,

Chai e Naldrett, 1992; Barnes et al., 2010; Li e Ripley, 2011). Infelizmente, nenhuma dessas abordagens pode ser aplicada às intrusões MUM de Nikolauz, que possuem afloramentos muito restritos. Além disso, composições de olivina não podem ser obtidas devido à alteração penetrante dos cristais de olivina em dunito e peridotito das intrusões de Nikolauz (Fig. 7I-J).

Apesar disso, as condições químicas iniciais do magma parental tendem a se assemelhar de perto à composição geoquímica das rochas com os maiores valores de Mg# em intrusões máfico-ultramáficas. O conteúdo de Fo da olivina mais primitiva foi estimado a partir do diagrama de Ti versus Mg# em rocha total, seguindo a abordagem utilizada por Sproule et al. (2007) na intrusão Shakespeare. A extrapolação da tendência linear de Ti para Mg# resultou em um valor de Fo estimado em 89.5, interpretado como a composição da olivina cristalizada a partir do magma parental antes de fracionamento significativo (Fig. 9I). A composição do magma foi estimada assumindo que as rochas ultramáficas mais primitivas das intrusões de Nikolauz se formaram pela solidificação de um mush cristalino composto por cristais de olivina e magma parental, de modo que a interseção da linha de tendência do diagrama MgO versus FeO com o Mg# de uma olivina Fo89.5 corresponde à composição do magma parental (Fig. 9G). As implicações dos conteúdos estimados de MgO e Fo obtidos para o magma parental da intrusão de Nikolauz serão discutidas em maior detalhe na seção de discussão deste estudo.

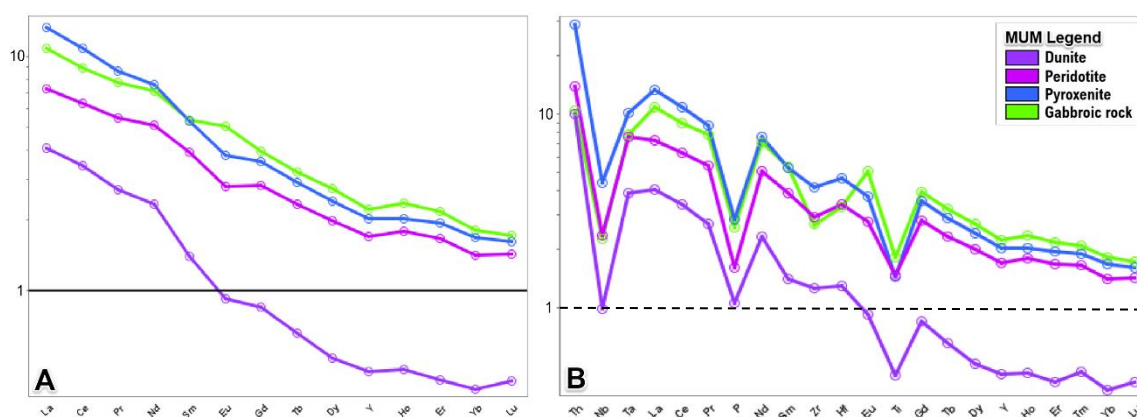


Fig. 10. (A) Padrões de elementos terras raras normalizados ao manto primitivo e (B) padrões de elementos traço resistentes à alteração para os teores médios das rochas máfico-ultramáficas das intrusões de Nikolauz. Os valores de normalização ao manto primitivo são de Sun e McDonough (1989).

4.2. Elementos traço

As rochas máfico-ultramáficas da intrusão de Nikolauz apresentam baixas concentrações de elementos-traço incompatíveis (e.g., Hf, Nb, La, Yb), uma característica típica de rochas cumuláticas. O efeito combinado de assembleias variáveis de minerais cumulus, fracionamento do magma parental e quantidades variáveis de líquido intercumulus retido controla os teores de elementos-traço incompatíveis em cumulos máfico-ultramáficos (e.g., Barnes, 1986; Ferreira Filho et al., 1998; Godel et al., 2011). Os padrões de elementos terras-raras (ETR) e de elementos-traço resistentes à alteração, normalizados ao manto, das rochas totais máfico-ultramáficas da intrusão de Nikolauz são mostrados na Fig.10. Os padrões de elementos-traço para diferentes rochas máfico-ultramáficas da intrusão de Nikolauz são notavelmente semelhantes, uma característica frequentemente usada para sugerir uma origem cogenética para rochas magmáticas. Os padrões de ETR são caracterizados por inclinação moderadamente negativa para HREE e mais acentuada para LREE, como indicado pelas razões $[Gd/Yb]_{PM}$ e $[La/Sm]_{PM}$ variando de 0.8 a 7.2 e de 1.0 a 8.9, respectivamente. Os padrões de elementos-traço resistentes à alteração, normalizados ao manto, para diferentes cumulos mostram anomalias negativas proeminentes de Nb-Ta, P e Ti. Apesar de padrões muito semelhantes, os conteúdos médios de elementos-traço resistentes à alteração em diferentes cumulos são distintamente diferentes (Fig. 10). Conteúdos distintos de elementos-traço imóveis em diferentes rochas cumuláticas são ilustrados pela concentração média de Hf (Fig. 11A), que aumenta de dunito (~0.1 ppm) para peridotito (~0.7 ppm), depois para piroxenito (~1.2 ppm) e então diminui nas rochas gabroicas (~0.5 ppm). Conteúdos variáveis, mas comumente muito baixos de Hf em dunito (Fig. 11A), assim como razões mais altas de La/Sm (Fig. 11C), são consistentes com pequenas quantidades de líquido intercumulus em rochas adcumulate de olivina.

Por outro lado, diferentes conteúdos de elementos incompatíveis em distintos tipos litológicos podem derivar da combinação de quantidades variáveis de líquido intercumulus, composições modais distintas de minerais com diferentes coeficientes de partição e fracionamento progressivo do magma

parental. Devido ao coeficiente de partição extremamente baixo de Hf no plagioclásio (Bédard, 2006), composições modais variáveis possivelmente explicam menores teores de Hf em cumulos contendo plagioclásio (Fig. 11A). Uma anomalia positiva discreta de Eu em rochas gabroicas (Fig. 10A), contrastando com uma anomalia negativa discreta de Eu em cumulos ultramáficos (dunito, peridotito, piroxenito), também está possivelmente ligada à presença de plagioclásio em rochas gabroicas.

A distribuição de elementos-traço em rochas ígneas é uma ferramenta chave para restringir a gênese magmática em relação ao seu contexto tectônico. Magmas gerados em zonas de subducção tipicamente exibem forte depleção em Nb e Ta, comumente atribuída à retenção desses elementos em resíduos portadores de rutilo durante a desidratação da placa (Gao et al., 2007) e à sua mobilidade específica em fluidos derivados da placa em condições típicas de subducção (Zheng, 2019). O enriquecimento em LREE em relação a MREE-HREE sugere ainda evolução magmática avançada, provavelmente impulsionada por interação com crosta continental. Essa interpretação é apoiada pelo comportamento geoquímico contrastante desses elementos, uma vez que suas concentrações no magma residual são controladas pela incompatibilidade (e.g., La) ou compatibilidade (e.g., Y, Yb) com anfibólio e granada. O tório é um elemento altamente incompatível que se torna progressivamente enriquecido durante a cristalização fracionada e é tipicamente concentrado em magmas evoluídos ou assimilado da crosta continental madura (Pearce & Reagan, 2019; Pearce, 2008).

Para analisar as rochas da intrusão máfico-ultramáfica de Nikolauz, a influência da acumulação de cristais sobre as razões geoquímicas foi removida; assim, dunitos e peridotitos adcumulate e mesocumulate foram excluídos do conjunto de dados. Embora a razão FeO/MgO aumente com a diferenciação magmática, o teor total de FeO diminui à medida que K_2O+Na_2O se enriquecem. Os dados também formam um cluster bem definido dentro do campo cálcio-alcalino no diagrama ternário AFM (Fig. 12B). No diagrama ternário Y–Nb–La (Fig. 12A), essas rochas se agrupam em direção ao enriquecimento em La–Y e se deslocam do vértice rico em Nb, indicando depleção pronunciada em Nb,

consistente com afinidade magmática típica de subducção. Além disso, as razões $[Nb/Th]_{PM}$ variam de ~ 0.05 a 10, embora a maioria dos valores esteja entre 0.1 e 1, sugerindo uma fonte derivada do manto com notável contribuição crustal (Fig. 12C). Barnes et al. (2023) observaram, no diagrama Nb/Yb vs. Th/Yb, que intrusões mineralizadas de LIP seguem uma tendência paralela ao vetor de contaminação entre Manto Primitivo (PM) e Crosta Superior média (UC). Em contraste, intrusões de margem convergente, como Xiarihamu, exibem trajetórias semelhantes, mas caracterizam-se por razões Nb/Yb e Nb/Th mais baixas, refletindo potencialmente uma fonte mantélica metasomatizada. As amostras de Nikolauz seguem um caminho comparável entre PM e Crosta Continental média (CC), mas apresentam razões Nb/Yb e Nb/Th relativamente menores, lembrando de perto a tendência de Xiarihamu (Fig. 12D).

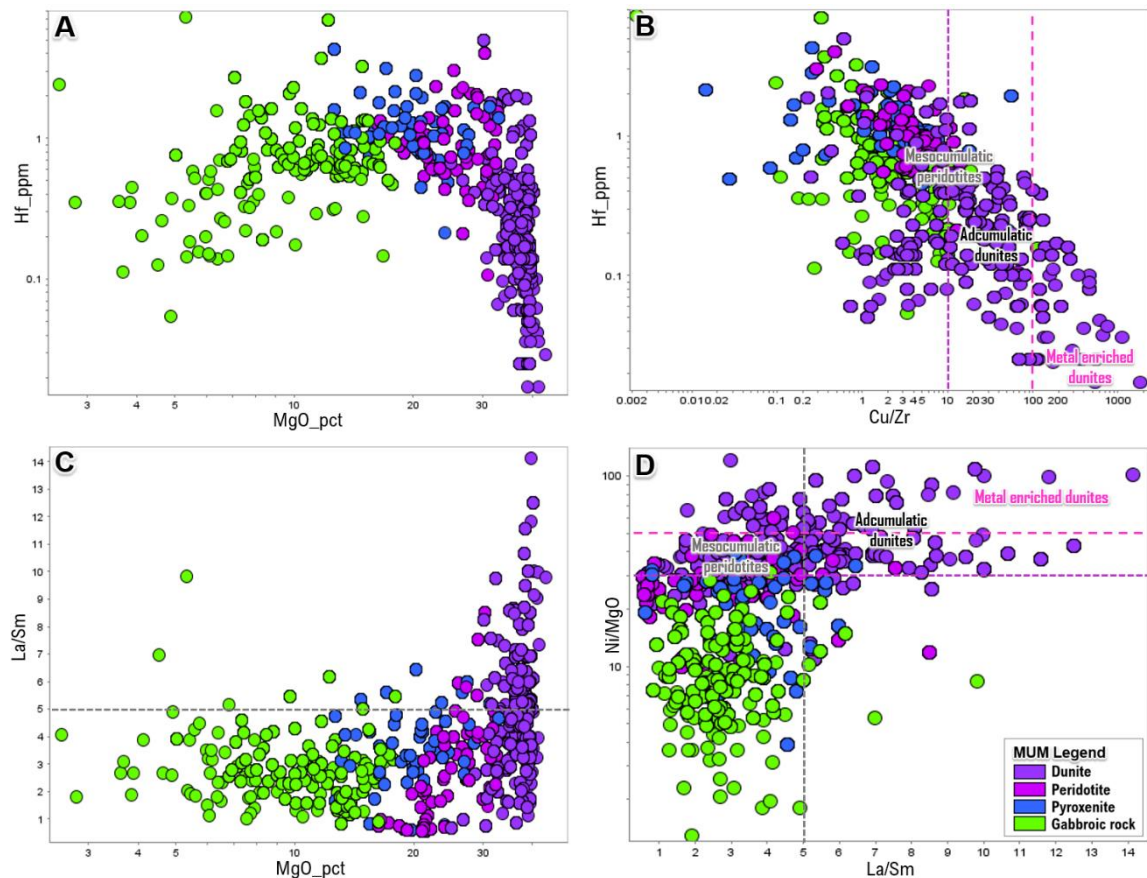


Fig. 11. Diagramas de elementos traço para as rochas máfico-ultramáficas das intrusões de Nikolauz. (A) Escala logarítmica de MgO versus Hf. (B) Cu/Zr (como índice de enriquecimento metálico) versus Hf. (C) Escala logarítmica de MgO versus La/Sm. (D) Ni/MgO (utilizado como índice de saturação em Ni) versus La/Sm.

A razão V/Sc é um proxy confiável para a oxidação magmática, uma vez que V é sensível ao estado redox, enquanto Sc permanece inerte (Li & Lee, 2004). Estudos experimentais mostram que o coeficiente de partição de V na olivina (D_{Ol}^V) diminui com o aumento do fO_2 em magmas, seguindo a equação estabelecida para arcos basálticos hidratados (Shishkina et al., 2018):

$$\Delta FMQ_{Liq} = -3.07 \times \log D_{Ol}^V - 3.34 \dots (1)$$

Onde D_{Ol}^V pode ser expresso da seguinte forma:

$$\begin{aligned} C_{Ol}^V / C_{Ol}^{Sc} &= D_{Ol}^V \times C_{Liq}^V / D_{Ol}^{Sc} \times C_{Liq}^{Sc} \\ C^{V/Sc}_{Ol} &= C^{V/Sc}_{Liq} \times (D_{Ol}^V / D_{Ol}^{Sc}) \\ D_{Ol}^V &= D_{Ol}^{Sc} \times (C^{V/Sc}_{Ol} / C^{V/Sc}_{Liq}) \dots (2) \end{aligned}$$

Onde D_{Ol}^{Sc} é constante e igual a ~0.2 (Sun e Liang, 2013).

De acordo com Cawthorn et al. (1991), as rochas cumuláticas permanecem em equilíbrio com o magma intersticial dentro de um ambiente magmático restrito. Em cumulos altamente primitivos, a concentração do elemento i no magma parental (C_{Liq}^i) pode ser derivada a partir de sua concentração na olivina (C_{Ol}^i) e na rocha cumulática (C_{WR}^i), utilizando a seguinte equação de balanço de massa:

$$C_{WR}^i = C_{Liq}^i \times F_{Liq} + C_{Ol}^i \times F_{Ol} \dots (3)$$

Onde F_{Liq} e F_{Ol} são as proporções de líquido magmático e olivina, respectivamente.

Para o conteúdo V/Sc, aplica-se a seguinte equação:

$$C^{V/Sc}_{WR} = C^{V/Sc}_{Liq} \times F_{Liq} + C^{V/Sc}_{Ol} \times F_{Ol}$$

Para as rochas cumuláticas primitivas de Nikolauz, foram considerados $F_{Liq} = 0.05$ e $F_{Ol} = 0.95$. A razão V/Sc em dunito cumulático de rocha total (Fo84), fora do domínio piroxenítico ($F_{Px} = 0$), é de ~ 10.74 . A olivina mais primitiva (Fo89.5) está associada aos valores mais baixos de Ti e corresponde a uma razão V/Sc de ~ 5.9 (Fig. 13A). Substituindo esses valores na Equação (3), o conteúdo de V/Sc do magma parental é estimado em ~ 102.7 . Utilizando $C^{V/Sc}_{Liq}$: ~ 102.7 e $C^{V/Sc}_{Ol}$: ~ 5.9 na Equação (2) para avaliar a Equação (1), o resultado é $\Delta FMQ-Liq = + 2.6$.

Embora a razão V/Sc em rocha total seja um bom indicador da fugacidade de oxigênio, o grau de fusão parcial do manto também a influencia; em maiores graus de fusão parcial sob condições oxidadas, o mesmo valor de V/Sc refletiria valores mais altos de fugacidade de oxigênio (Lee et al., 2005). Para magmas do tipo MORB, a fusão parcial é tipicamente baixa ($\sim 10\%$; Lee et al., 2005), enquanto magmas komatiíticos exibem graus mais elevados de fusão, variando de $\sim 30\%$ em variantes empobrecidas em Al a $\sim 50\%$ em variantes não-empobrecidas em Al (Sossi et al., 2016). Em ambientes convergentes relacionados à subducção, esses graus de fusão parcial podem variar entre 15–20% (Cao et al., 2020).

A partir das relações entre V/Sc, ΔFMQ e fusão parcial (F%) estabelecidas por Lee et al. (2005), onde ΔFMQ é mostrado como curvas de contorno em um diagrama de V/Sc em rocha total versus F%, os magmas ultramáficos primitivos de Nikolauz exibem uma fugacidade de oxigênio de ΔFMQ : $+ 2.6$, e o V/Sc medido em dunito cumulático primitivo é de ~ 10.74 . Ao posicionar esses valores no diagrama de Lee, o grau de fusão parcial correspondente é de aproximadamente $\sim 18\%$ (Fig. 13B). Utilizando a Equação (3), com F_{Liq} : 0.05, F_{Ol} : 0.95, e considerando um teor de Ti de 240 ppm em dunito cumulático primitivo (Mg#: 84), juntamente com os valores mínimos de Ti (119,9 ppm) associados às olivinas mais primitivas (Mg#: 89.5) (Fig. 13A), a concentração de Ti no magma parental é estimada em 2518 ppm, equivalente a $TiO_2 = 0.42\%$

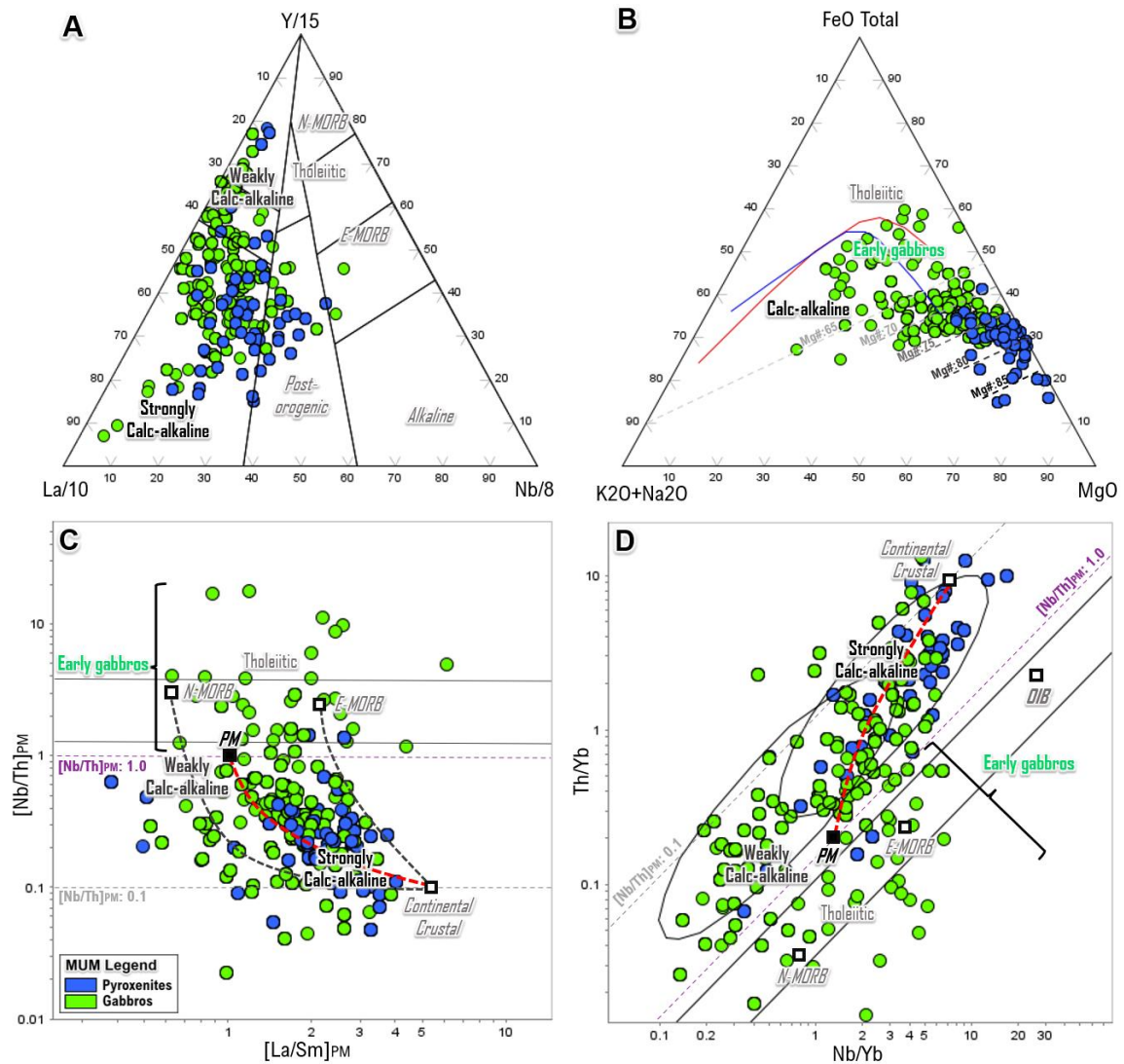


Fig. 12. (A) Diagrama ternário La-Y-Nb: A maioria das amostras se agrupa próximo ao vértice de La, indicando enriquecimento em La e forte empobrecimento em Nb e Y, consistente com uma assinatura geoquímica calco-alkalina. (B) Diagrama AFM: Com base nas razões MgO/FeO, os gabros iniciais exibem comportamento fracamente calco-alkalino, enquanto as unidades máfico-ultramáficas cumuláticas se posicionam dentro do campo calco-alkalino. (C) Razões Nb/Th e La/Sm normalizadas ao manto: As rochas máfico-ultramáficas cumuláticas exibem uma tendência do Manto Primitivo (PM) em direção às médias da crosta continental, sugerindo contribuição crustal significativa. (D) Razões Th/Yb e Nb/Yb: As rochas máfico-ultramáficas seguem uma tendência entre o Manto Primitivo (PM) e a Crosta Superior (UC), indicando fontes mantélicas metasomatizadas influenciadas por aporte crustal.

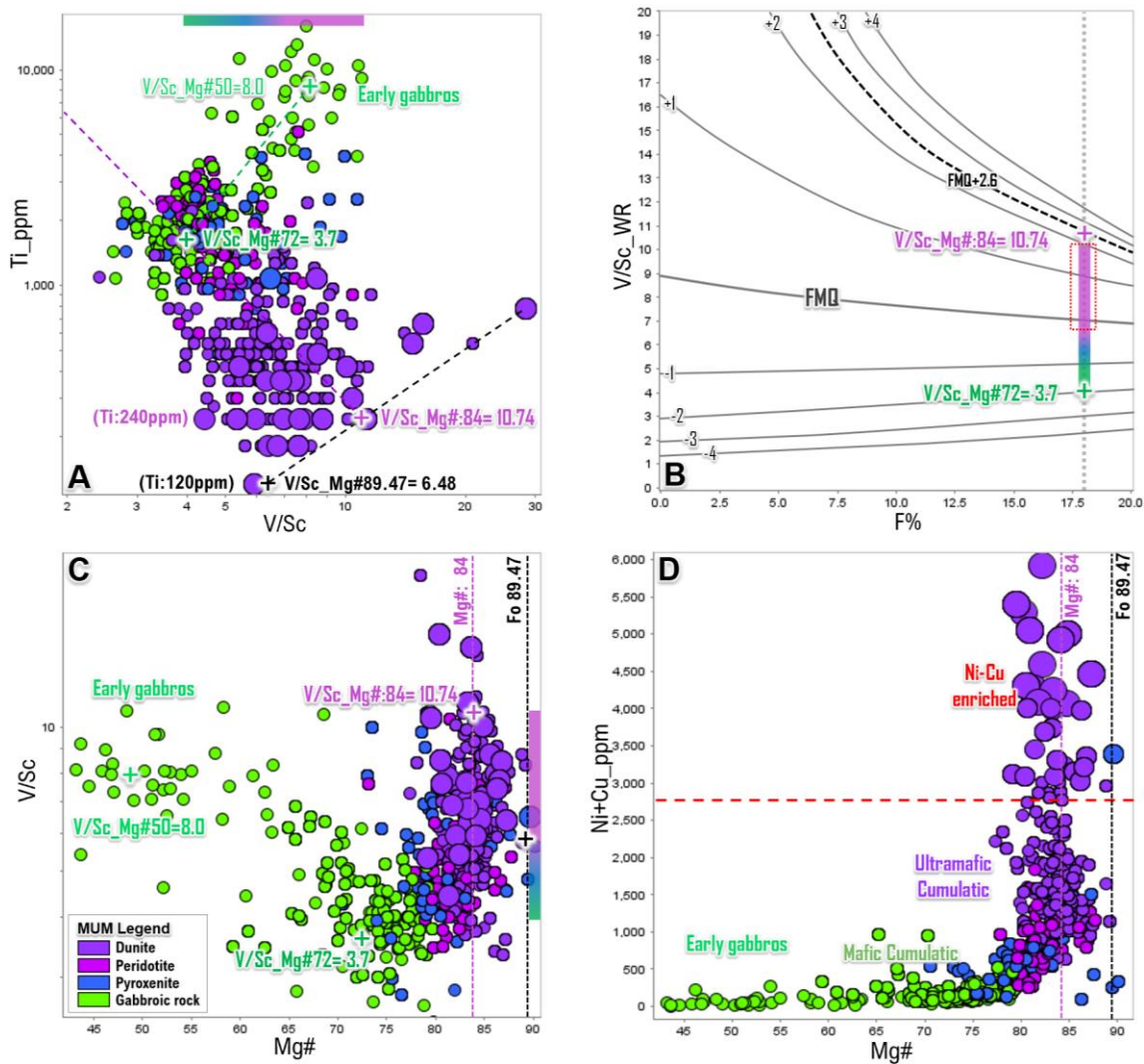


Fig. 13. (A) Diagrama Ti versus V/Sc. O Ti mínimo e o Mg# máximo (~89.5) refletem magmas primitivos próximos à sua fonte mantélica. Nessas condições, o V/Sc atinge ~6.48, representando olivina primitiva. Ao longo da tendência cumulática máfico-ultramáfica (Mg# 72–84), valores médios de V/Sc foram estabelecidos em ~3.7 para gabros e ~10.74 para dunitos. (B) V/Sc em rocha total versus F% (grau de fusão parcial), baseado em Cao et al. (2020). O valor de Δ FMQ do magma primitivo calculado (FMQ+2.6), derivado da fórmula de Shishkina et al. (2018) utilizando V/Sc_Ol e V/Sc_dunitite (V/Sc do magma parental; ver fórmula 7 no texto), foi interpolado com valores de V/Sc em rocha total segundo o diagrama de Cao et al. (2020). A interseção da curva FMQ+2.6 com o valor de V/Sc (~10.74) dos dunitos médios (Mg# 84) sugere um grau de fusão parcial de ~18%. (C) Diagrama V/Sc versus Mg#. Dunitos (Mg# 84) mostram um V/Sc médio de ~10.74, diminuindo para ~3.7 em gabros cumuláticos diferenciados (Mg# 72). Gabros ricos em Ti (Mg# <65) exibem um V/Sc médio de ~8.0. (D) Diagrama Ni+Cu versus Mg#. Amostras enriquecidas em Ni-Cu (>2800 ppm) são definidas, com a maioria das amostras mineralizadas concentrando-se em torno de Mg#: 84 ± 2.5 .

4.3. Elementos calcófilos

As rochas com alto enriquecimento em sulfetos ($\text{Cu/Zr} > 100$) apresentam as menores concentrações de Hf (< 0.2 ppm), consistente com sua ocorrência principalmente em rochas adcumulate ricas em olivina (Fig. 11B). Cumulatos ricos em olivina enriquecidos em Ni-Cu também contêm teores muito baixos de elementos-traço incompatíveis, tais como Nb (< 0.5 ppm), La (< 2.9 ppm) e Yb (< 0.15 ppm). Essas litologias, particularmente rochas ultramáficas adcumulate com alta saturação em Ni ($\text{Ni/MgO} > 30$; Fig. 11D), comumente exibem razões elevadas de LREE/MREE (e.g., $\text{La/Sm} > 5$).

O Ni mostra correlação positiva com MgO, com concentrações médias de ~135 ppm em rochas gabroicas, ~470 ppm em piroxenito, ~770 ppm em peridotito e ~1500 ppm em dunito. Notavelmente, entre rochas ultramáficas com 36–40% MgO (Mg#: 82–87), algumas amostras enriquecidas em Ni atingem concentrações de ~2500 a 6000 ppm (Fig. 14B, Fig. 11D). O cobre, em contraste, comporta-se como elemento incompatível durante a cristalização de minerais silicáticos cumuláticos em magmas sub-saturados em sulfeto, mantendo uma razão Cu/Zr praticamente constante. Valores abaixo da referência do manto primitivo ($[\text{Cu/Zr}]_{\text{MN}}: \sim 5$) sugerem extração de líquido sulfetado, enquanto valores mais altos indicam acúmulo de sulfetos (Barnes, 2023). Em concordância com essas observações, a intrusão de Nikolauz também mostra uma diminuição progressiva no conteúdo de EGP com o aumento da diferenciação. Em dunito adcumulate, onde não se observa enriquecimento em elementos calcófilos, os teores de Pd+Pt atingem ~12.6 ppb (Pd: 5.45 ppb, Pt: 7.14 ppb). Essa tendência continua no peridotito (~8.6 ppb Pd+Pt), piroxenito (~4.5 ppb Pd+Pt) e em rochas gabroicas, onde Pd+Pt diminui para ~0.5 ppb. Rochas ultramáficas enriquecidas em elementos do grupo da platina (EGP) caracterizam-se por maiores teores de Cr e valores anômalos de Pd+Pt variando entre 20–150 ppb (Fig. 14D, Fig. 16). Amostras com maiores teores de Ni+Cu (3000–6000 ppm) e Pd+Pt (20–120 ppb) exibem os valores mais altos de $\text{Cu/Zr} > 100$ e $\text{Ni/MgO} > 50$. A forte correlação entre essas razões, especialmente para valores de $\text{Cu/Zr} > 10$, sugere um controle de saturação em sulfeto e sustenta seu uso como indicadores confiáveis de enriquecimento em elementos calcófilos (Fig. 14A).

Queffurus e Barnes (2015) demonstraram que em ambientes metasomatizados ou hidrotermalmente alterados, o Se permanece estável, enquanto o S é mais móvel, frequentemente sendo depletado e redistribuído. As razões S/Se no manto variam de 2850 a 4350, com valores acima desse intervalo sinalizando contaminação crustal. Em sistemas magmáticos, a razão S/Se pode servir como um indicador útil da contribuição relativa manto–crosta, fornecendo contexto para a interpretação do comportamento do enxofre. Em rochas metasomatizadas, ela pode ser aplicada para aproximar o conteúdo original de S, embora tais estimativas devam ser tratadas como referência e não como valor definitivo. Para a intrusão de Nikolauz, o selênio (Se) mostra correlação consistente com os metais Ni-Cu (Fig. 14B), indicando que mesmo em amostras alteradas, a mineralização magmática de Ni-Cu não foi significativamente remobilizada por processos pós-magmáticos. Essa interpretação é ainda reforçada pelas evidências de sondagem, nas quais o S é variavelmente remobilizado durante o overprinting metasomático, enquanto o Se permanece consistentemente correlacionado aos sulfetos de Ni-Cu. A comparação de enxofre (S) com Se revela duas tendências: uma indicativa de maior influência crustal e outra refletindo uma assinatura mista manto–crosta ($S/Se \approx 5065$), embora a maioria das amostras se concentre em baixos valores de S e Se (Fig. 14C). O uso do valor sintético de S derivado de Se para calcular os teores de Ni e Cu via fórmula de Barnes e Lightfoot (2005) introduz um grau de incerteza; embora as tendências geoquímicas sejam melhoradas, os teores calculados podem permanecer superestimados. Em qualquer caso, isso reforça a necessidade de interpretar tais teores com cautela e de considerar a razão S/Se principalmente como indicador qualitativo de interação crustal.

Teores de Ni, Cu foram calculados com a fórmula de Barnes e Lightfoot (2005):

$$C_{100\%sul}^{Metal} = C_{WR}^{Metal} \times 100 / (C_{WR}^{S^*} \times 2.527 + C_{WR}^{Cu} \times 0.3408 + C_{WR}^{Ni} \times 0.4715) \dots (4)$$

Donde $C_{WR}^{S^*}$, C_{WR}^{Cu} , C_{WR}^{Ni} son concentraciones estimadas de S, Cu y Ni en toda la roca en porcentaje, lo que da como resultado:

$$C_{100\%sul}^{Ni}: \sim 5 - 10\% \text{ (Fig. 14E)}, C_{100\%sul}^{Cu}: \sim 1.5 - 4\% \text{ (Fig. 14F)}.$$

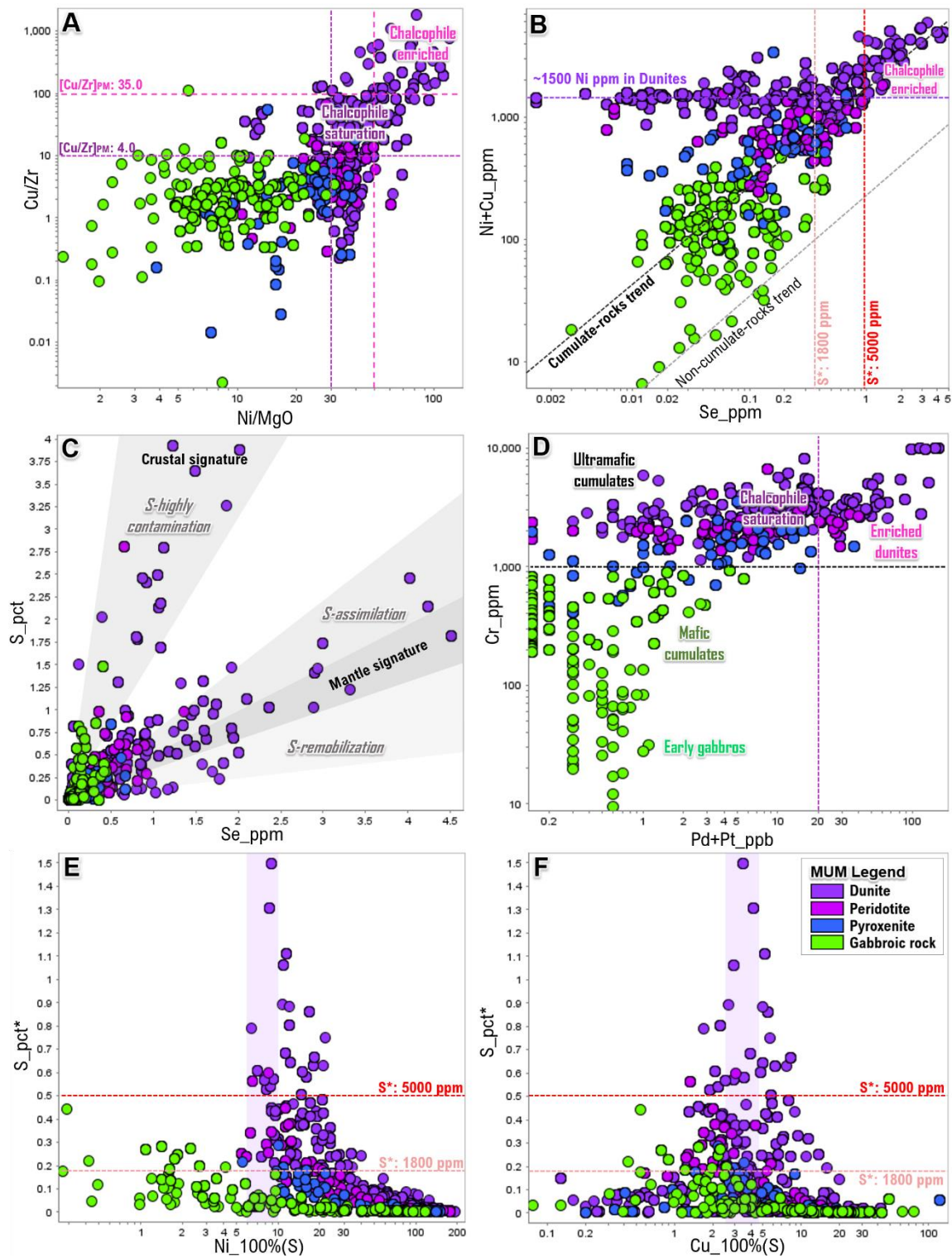


Fig. 14. (A) O diagrama Cu/Zr versus Ni/MgO mostra uma forte correlação positiva entre essas razões, destacando que rochas com Ni/MgO elevado (>50) e Cu/Zr (>100) representam adcumulate ultramáficos altamente saturados em sulfetos. (B) Ni+Cu (ppm) vs. Se (ppm): observa-se uma forte correlação entre Ni-Cu e Se, sugerindo que a distribuição geoquímica desses metais é controlada pelos sulfetos. O Se, devido à sua afinidade calcófila e maior estabilidade em relação ao S em ambientes metasomatizados, permanece concentrado em zonas mineralizadas. (C) O diagrama S (wt%) versus Se (ppm) da intrusão San José mostra duas

tendências principais: uma tendência de alta inclinação (S/Se ~25.000), associada a maior contaminação crustal, e uma tendência de inclinação mais baixa (S/Se 4350–6100), refletindo a assinatura magmática de Nikolauz, com S/Se médio de ~5065. (D) O diagrama Cr versus Pd+Pt mostra uma forte correlação positiva, em que as maiores concentrações de Pd+Pt (~20–150 ppb) estão associadas a rochas ultramáficas cumuláticas ricas em cromita. (E–F) Os diagramas S (wt%) versus Ni100%(S) e Cu100%(S) ilustram estimativas sintéticas derivadas de valores de S baseados em Se. Estes fornecem tendências qualitativas na distribuição de Ni e Cu, mas não devem ser considerados teores definitivos, já que podem estar superestimados.

4.4. Zonificación máfico-ultramáfica

Os furos de sondagem NIKZ0001 e NIKZ0002 fornecem uma visão detalhada da geometria e da composição interna da intrusão de Nikolauz. Os dados de rocha total revelam padrões distintos de variação, refletindo a composição de proporções variáveis de minerais cumulus (olivina, clinopiroxênio, plagioclásio, cromita) e de componentes líquidos sulfetados (Ni, Cu, Pd, Pt, S, Se).

No furo NIKZ0001 (Fig. 15), o MgO segue uma tendência linear monotônica (~38%) ao longo da zona de dunito de granulação média (adcumulato), com FeO e Cr consistentemente acima de 12% e 2000 ppm, respectivamente, indicando cumulos de olivina–cromita–piroxênio. Em direção às margens, MgO, Cr e FeO diminuem, marcando fases diferenciadas enriquecidas em Al_2O_3 , TiO_2 e CaO, correspondentes a peridotito de granulação fina (mesocumulato). Zonas de piroxenito de granulação média a grossa (meso a ortocumulato) apresentam valores de Cr geralmente abaixo de ~2000 ppm, indicando Cr hospedado em piroxênio ou cromita subordinada. Piroxenito com Cr abaixo de ~1000 ppm sugere ausência de cromita. Alguns intervalos de peridotito–piroxenito (e.g., 160–170 m) exibem $\text{CaO} > 10\%$, sugerindo cumulos de clinopiroxênio. As margens máfico-ultramáficas mais diferenciadas contêm rochas gabroicas de granulação média a grossa (ortocumulos, vari-texturais), com teores relativamente menores de MgO (~10%), FeO (~6.5%) e Cr (~350 ppm). Esses limites ultramáficos truncam abruptamente o perfil geoquímico, indicando que o pulso magmático que formou os cumulos ultramáficos cortou

um domínio gabroico pré-existente. Em profundidades superiores a 250 metros, foram interceptadas intrusões graníticas com ~70% de SiO_2 .

O furo NIKZ0002 (Fig. 16) mostra forte covariância Ni–Cu–Pd–Pt–S–Se, refletindo a presença de sulfetos disseminados de Ni-Cu em dunito. O Ni correlaciona-se fortemente com o Cu, particularmente entre 250–290 metros, onde Ni atinge 0.3–0.4% e Cu 0.12–0.15%. Pd e Pt também exibem forte correlação mútua, com picos de ~14 ppb Pd e ~12 ppb Pt em zonas ricas em sulfetos, além de variações erráticas que alcançam ~86 ppb Pd e ~71 ppb Pt. A covariância S–Se varia de moderada a alta, embora o overprinting metasomático tenha remobilizado e depletado S em vários setores, enquanto o Se permanece fortemente correlacionado com Ni-Cu.

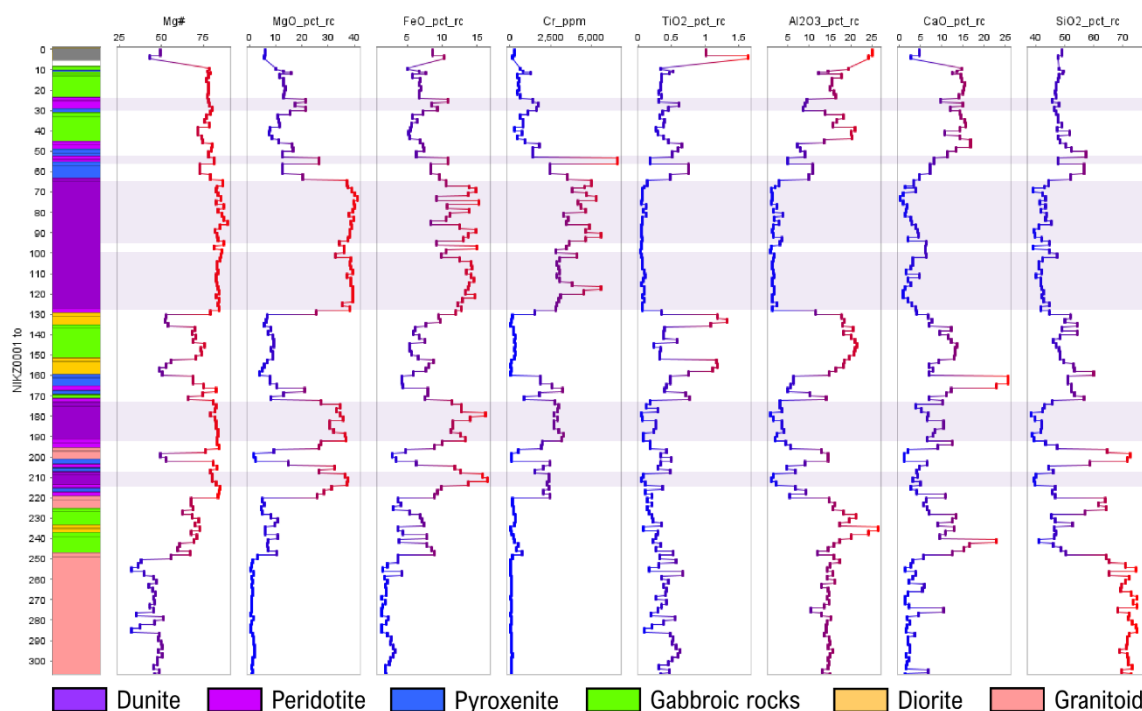


Fig. 15. Perfis litogeoquímicos ao longo da sondagem NIKZ0001 mostrando Mg#, MgO, FeO, Cr, TiO_2 , Al_2O_3 , CaO e SiO_2 . As barras coloridas à esquerda representam os intervalos litológicos descritos no testemunho. As faixas sombreadas em púrpura destacam as intrusões dunitíficas, caracterizadas por valores elevados de Mg# e MgO, enriquecimento em Cr e mínimos de TiO_2 , Al_2O_3 , CaO e SiO_2 , compatíveis com a acumulação de olivina $\pm$ cromita. As transições para peridotitos/piroxenitos e, finalmente, para gabros são reconhecidas pela diminuição de Mg# e pelo aumento progressivo de TiO_2 , Al_2O_3 , CaO e SiO_2 , refletindo maior participação de piroxênios e plagioclásio. Os altos valores de SiO_2 permitem identificar intrusões graníticas, especialmente na base da sondagem. Os dados de rocha total provêm do banco geoquímico da Rio Tinto; as unidades estão indicadas nos eixos.

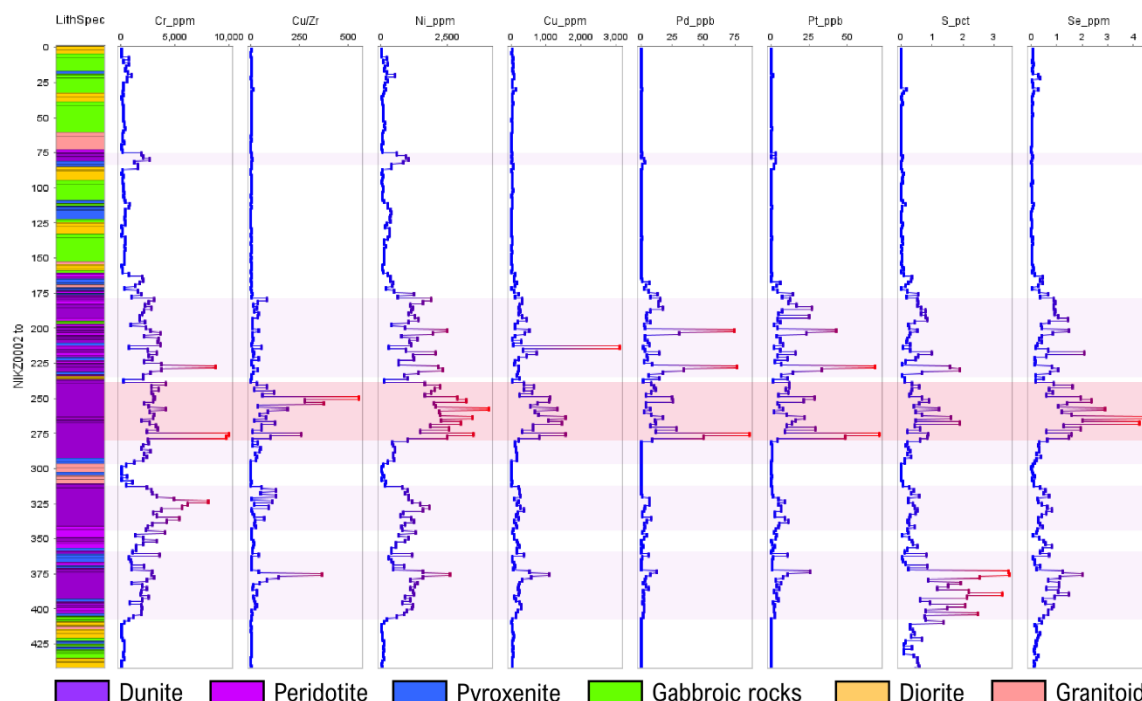


Fig. 16. Perfis litogeoquímicos do furo NIKZ0002 mostram a distribuição vertical de elementos calcófilos (Ni, Cu, Pd, Pt, S e Se), integrados a proxies de controle litológico e metalogênico. O Cr é utilizado como elemento de referência litófilo, por refletir diretamente a abundância relativa de minerais primários ricos em cromita, enquanto a razão Cu/Zr é empregada como indicador de saturação em sulfetos, funcionando como um proxy de enriquecimento metálico e possível segregação de fases sulfuradas. A leitura integrada dos perfis permite reconhecer três domínios principais: (i) as intrusões ultramáficas, destacadas pela área sombreada em roxo-azulado, caracterizadas por maiores teores de Cr e Mg# e baixos valores de elementos incompatíveis, refletindo acumulação cumulática de olivina $\pm$ cromita; (ii) a zona máfica, de litologias verdes na legenda, caracterizada por baixos valores de Cr e Mg#; e (iii) a zona enriquecida em sulfetos disseminados de Ni-Cu, destacada pela área sombreada em vermelho, onde se observa um incremento sistemático de Ni, Cu, Pd, Pt, S e Se, em associação a um aumento significativo da razão Cu/Zr. Esse padrão sugere a presença de um intervalo favorável à acumulação de sulfetos magmáticos, interpretado como o principal horizonte mineralizado dentro da intrusão máfico-ultramáfica. A integração desses dados com a estratigrafia litológica do furo permite não apenas diferenciar entre intrusões cumuláticas ultramáficas e zonas máficas, mas também identificar os níveis duniticos favoráveis à mineralização de Ni-Cu.

CAPÍTULO V: Geocronologia e Geoquímica de Zircões: Características Tectono-Magmáticas das Intrusões Máfico-Ultramáficas de Nikolauz da Cordilheira Oriental do Peru

5.1. Geocronologia U-Pb em Zircão das Intrusões Gabroicas de Nikolauz

Zircões foram extraídos de rochas gabroicas do sistema magmático Nikolauz (amostras 51770402–51770408) e de uma intrusão granítica (amostra 51770401) localizada ao norte das unidades máfico-ultramáficas. Em litologias primitivas, a recuperação de zircão é limitada devido à baixa saturação de Zr. No entanto, as unidades gabroicas, que representam as bordas mais evoluídas do conduto, apresentam concentrações de Zr entre 100 e 400 ppm. Essas rochas, apesar da foliação moderada a intensa, preservam texturas magmática, domínios de textura variável e mostram continuidade geoquímica com as dunitos adjacentes, refletindo uma diferenciação magmática progressiva dentro da sequência ultramáfica–máfica. Todas as amostras apresentaram razões Th/U superiores a 0.3, confirmando a origem magmática dos zircões (Hoskin & Black, 2000; Belousova et al., 2002). As condições de fugacidade de oxigênio foram estimadas com base no método proposto por Loucks et al., (2020), que calcula o desvio em relação ao buffer FMQ (fayalita–magnetita–quartzo) com base na geoquímica de elementos-traço em zircões. Os valores calculados de ΔFMQ variam entre -0.2544 e $+2.03$, indicando um espectro de condições redox no momento da cristalização.

Trinta e cinco análises U–Pb foram realizadas na amostra **51770401** (granito de feldspato alcalino), das quais 14 correspondem a domínios herdados, com idades entre 799.9 e 1260,2 Ma. As demais apresentam idades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ entre 430,9 e 572.5 Ma. As 21 análises concordantes definem uma idade de concordia de 467.9 ± 2.1 Ma (MSWD = 0.71; $p(x^2) = 0,4$), interpretada como a idade de cristalização. Os conteúdos de Th variam entre 93.94 e 986.21 ppm, U entre 164.35 e 1152.46 ppm, com razões Th/U entre 0.36 e 0.98. O valor ΔFMQ calculado é -0.48 ± 0.25 , sugerindo condições redutoras. A amostra **51770402** (rocha gabroica) apresentou 27 análises concordantes, com idades entre 295.6 e 362.4 Ma. A idade de concordia é 323.0 ± 3.0 Ma (MSWD = 0.78; $p(x^2) = 0.38$). Os teores de Th variam de 4.16 a 469.31 ppm, U de 10.88 a 462.35 ppm, e as

razões Th/U entre 0.33 e 1.38. O ΔFMQ calculado é $+1.43 \pm 0.08$. Na amostra **51770403** (rocha gabroica rica em pirita), 43 análises concordantes definem uma idade de concordia de 312.2 ± 3.2 Ma (MSWD = 0.0088; $p(x^2) = 0.93$), com teores de Th entre 10.75 e 112.52 ppm, U entre 17.29 e 95.41 ppm, e razões Th/U de 0.42 a 1.54. O ΔFMQ obtido é $+1.08 \pm 0.09$. A amostra **51770404** (rocha gabroica de textura variada) forneceu oito análises, das quais cinco são concordantes e definem uma idade de 305.3 ± 5.7 Ma (MSWD = 0,0042; $p(x^2) = 0,95$), com idades individuais entre 327.1 e 330.6 Ma. Os grãos herdados indicam idades de 975.4 e 1683.5 Ma. Os teores de Th variam de 3.11 a 51.95 ppm, U de 6.44 a 76.83 ppm e as razões Th/U entre 0.48 e 0.67. O valor ΔFMQ é -0.25 ± 0.50 . Na amostra **51770405** (rocha gabroica rica em pirita), 35 pontos de análise foram obtidos, sendo um hergado. Os 34 restantes são concordantes e fornecem uma idade de 315.2 ± 5.4 Ma (MSWD = 0.077; $p(x^2) = 0.78$). As idades individuais variam de 285.7 a 363.6 Ma. Os teores de Th variam de 10.75 a 112.52 ppm, U de 17.29 a 95.41 ppm e as razões Th/U de 0.42 a 1.54. O ΔFMQ estimado é $+0.82 \pm 0.14$. Na amostra **51770406** (rocha leucogabroica), 22 zircões concordantes com idades entre 283.2 e 344.4 Ma definem uma idade de concordia de 316.4 ± 2.9 Ma (MSWD = 0.76; $p(x^2) = 0.38$). Os conteúdos de Th variam entre 13.59 e 307.04 ppm, U entre 27.55 e 283.46 ppm, com razões Th/U de 0.41 a 1.08. O ΔFMQ calculado é $+1.58 \pm 0.15$. Na amostra **51770407** (rocha gabroica de textura variada), apenas um grão foi analisado. A idade obtida é 343.9 ± 9.5 Ma (MSWD = 0). O zircão apresenta 144.96 ppm de Th, 435.03 ppm de U e razão Th/U de 0.33. Não há idade de concordia estatisticamente robusta. A amostra **51770408** (rocha gabroica rica em aptatite) forneceu 24 análises concordantes com idades entre 252.7 e 375.4 Ma. A idade de concordia é 313.7 ± 7.4 Ma (MSWD = 0.08; $p(x^2) = 0.78$). Os conteúdos de Th variam de 3.94 a 234.16 ppm, U de 6.01 a 215.19 ppm, com razões Th/U entre 0.65 e 2.32. O ΔFMQ estimado é $+2.04 \pm 0.15$, o mais alto do conjunto (Fig. 17, 18).

Nossos resultados geocronológicos U–Pb revelam três populações principais: Grenville–Sunsas (971.7–1167.8 Ma; pico: 1030.5 Ma), Famatiniana (461.7–494.5 Ma; pico: 471.8 Ma) e Gondwanida (305.6–328.7 Ma; pico: 314.1 Ma). As idades Proterozóicas refletem zircões herdados em litologias graníticas e gabroicas, enquanto as idades Ordovicianas provêm exclusivamente de

zircões do sienogranito biotítico (51770401). Em contrapartida, as idades Carboníferas, diretamente vinculadas às rochas máficas e ultramáficas do sistema condutivo, marcam um episódio magmático gondwânico de alta temperatura (até 1300 °C), caracterizado por cristalização cumulática, associação com mineralização Ni-Cu e contexto geodinâmico de post-compressão. Este evento representa o principal pulso máfico-ultramáfico da área e está temporalmente vinculado à evolução tardiocarbonífera da margem ocidental de Gondwana.

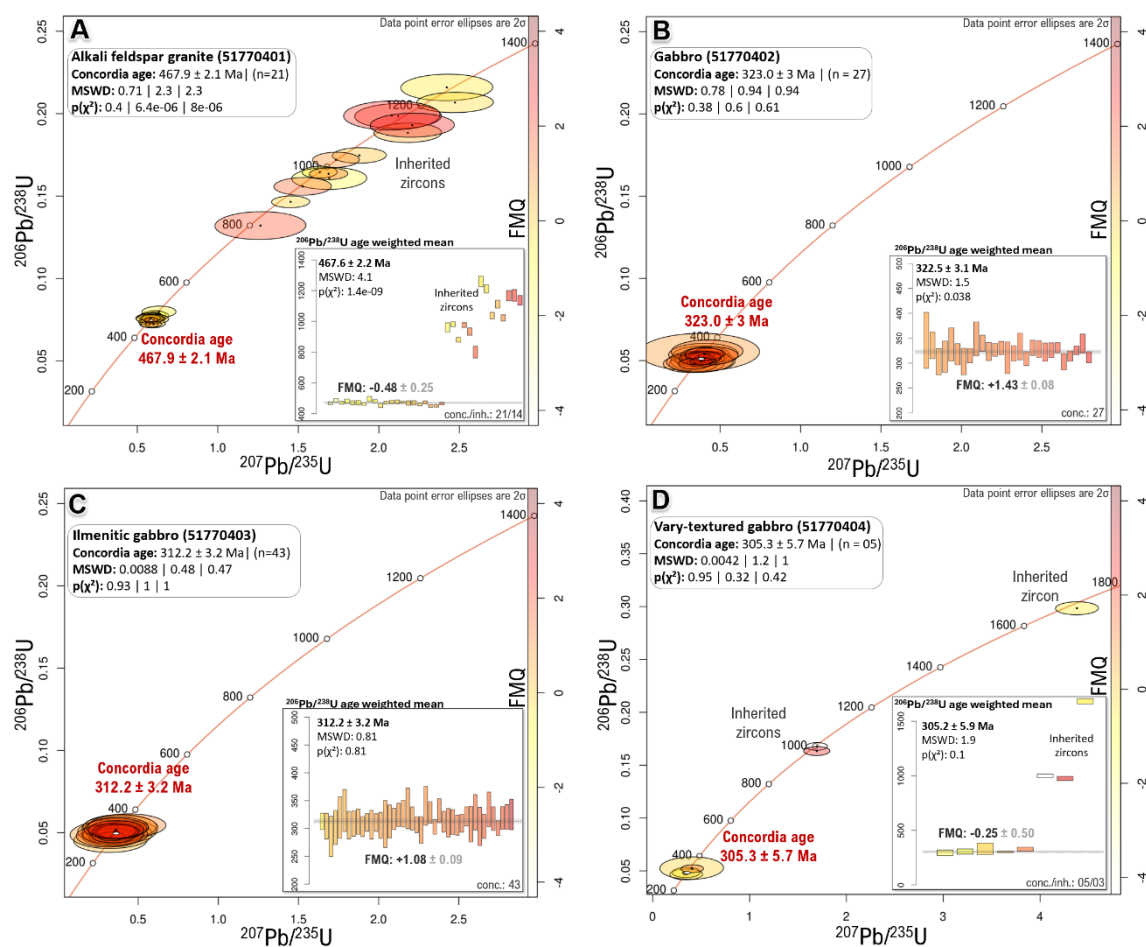


Fig. 17. Idades U–Pb em zircões de quatro intrusivos da Cordilheira Oriental. (A) O sienogranito famatiniano registra uma idade concordia de 467.9 ± 2.1 Ma, representando um pulso magmático reduzido e acompanhado por zircões herdados. (B–D) As unidades máficas gondwânicas (rochas gabbroicas) apresentam idades entre 323 e 305 Ma, refletindo um magmatismo pós-colisional associado a condições variando de oxidantes a intermediárias. A presença de zircões herdados em alguns destes corpos indica assimilação crustal durante a evolução magmática.

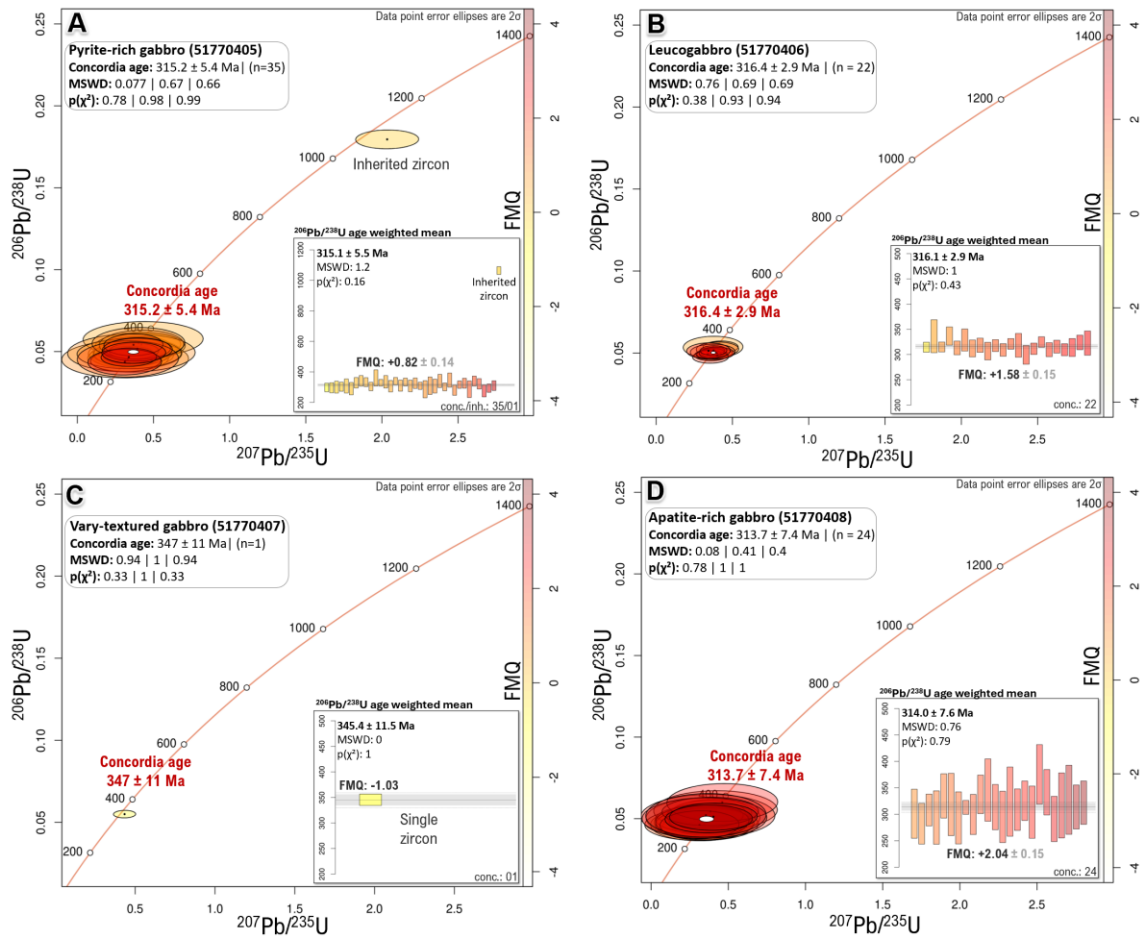


Fig. 18. Idades U–Pb em zircões de quatro intrusivos máficos gondwânicos (347–313 Ma), marcados por variações nas condições redox e ocorrência isolada de zircões herdados.

5.2. Geoquímica de Zircão

A geoquímica de zircões representa uma ferramenta poderosa para reconstruir com alta resolução a evolução tectono-magmática de sistemas magmáticos. Devido à sua resistência ao metamorfismo e à alteração, bem como à capacidade de preservar assinaturas químicas herdadas do magma original, os zircões permitem identificar fontes mantélicas ou crustais, alcalinidade, condições redox e teor de H_2O (Grimes et al., 2015; Zhong et al., 2023; Loucks & Fiorentini, 2023; Loucks et al., 2020).

Razões como Th/Yb e U/Yb funcionam como proxies de aporte crustal, permitindo discriminar magmas derivados de crostas maduras ou primitivas, enquanto razões como Nb/Yb e Th/Nb refletem a alcalinidade e o grau de interação com a crosta. Anomalias de Eu/Eu* e Ce/Ce* têm sido empregadas

para inferir o estado redox e o fracionamento de plagioclásio, embora estudos recentes tenham apontado suas limitações, especialmente em sistemas com coprecipitação de minerais acessórios como titanita, apatita e rutilo (Loader et al., 2022; Manor et al., 2024). Ainda assim, proxies como $10^4 \times (\text{Eu}/\text{Eu}^*)/\text{Yb}_n$ têm se mostrado úteis para estimar o conteúdo relativo de H_2O (Loucks et al., 2024). Além disso, a relação logarítmica entre Ce, U e Ti permite aplicar um oxibâmetro quantitativo, por meio da expressão $\Delta\text{FMQ} = 3.997 \times \log[\text{Ce}/\sqrt{(\text{U} \cdot \text{Ti})}] + 2.272$, que estima a fugacidade de oxigênio durante a cristalização do zircão (Loucks et al., 2020). Dessa forma, a análise integrada de elementos traço em zircões não apenas permite reconstruir a petrogênese de magmas antigos, mas também avaliar suas características metalogenéticas.

Os zircões provenientes dos gabros de Nikolauz exibem uma assinatura geoquímica compatível com magmas calco-alcalinos de arco. No diagrama U/Yb vs. Nb/Yb, apresentam razões baixas de Nb/Yb (<0.02) e moderadas de U/Yb (0.1–1.0), o que indica uma fonte empobrecida em Nb e com influência crustal significativa. Essa tendência é reforçada no gráfico Th/Nb vs. Th/Yb, onde os altos valores de Th/Nb (>10) sugerem interação com crosta madura, enquanto as relações Th/Yb são compatíveis com características de magmas do tipo I. No diagrama Nb/Yb vs. Ce/Nb, os dados de Nikolauz definem um padrão de diminuição de Nb/Yb à medida que aumenta Ce/Nb, evidenciando um caráter oxidado e empobrecido em Nb, típico de magmas de arco e contrastante com as tendências de magmas do tipo A. Por fim, o gráfico Nb/Yb vs. $10^4 \times (\text{Eu}/\text{Eu}^*)/\text{Yb}_n$ mostra valores baixos de Nb/Yb associados a proxies hídricos moderadamente altos, sugerindo condições de cristalização em ambientes hidratados e oxidados. Em conjunto, esses padrões sustentam uma origem calco-alcalina, com teores significativos de água, alta fugacidade de oxigênio e marcada interação crustal para os gabros de Nikolauz, coerentes com um ambiente tectônico de arco (Fig. 19)

Os zircões dos gabros de Nikolauz apresentam temperaturas de cristalização calculadas ($T^\circ\text{C}_{\text{zircon}}$) entre aproximadamente 750°C e 950°C , com um agrupamento principal entre 780°C e 875°C . Do ponto de vista redox,

os dados indicam uma alta fugacidade de oxigênio ($\log fO_2$), com a maioria das amostras posicionando-se consistentemente acima do buffer FMQ, e frequentemente entre FMQ e NNO+1. Essa assinatura é corroborada pelo diagrama de ΔFMQ , no qual a maioria das amostras verdes se concentra no intervalo de $\Delta FMQ \approx +0.5$ a $+2.5$, refletindo um ambiente claramente oxidante, compatível com magmas calco-alcalinos de arco. A combinação de temperaturas intermediárias a altas nas unidades mais diferenciadas, aliada a elevadas condições redox, sugere que esses gabros cristalizaram a partir de um magma primitivo marcadamente hidratado e oxidado, com potencial para manter metais em solução ao longo de seu ascenso até os níveis mais altos da crosta (Fig. 20)

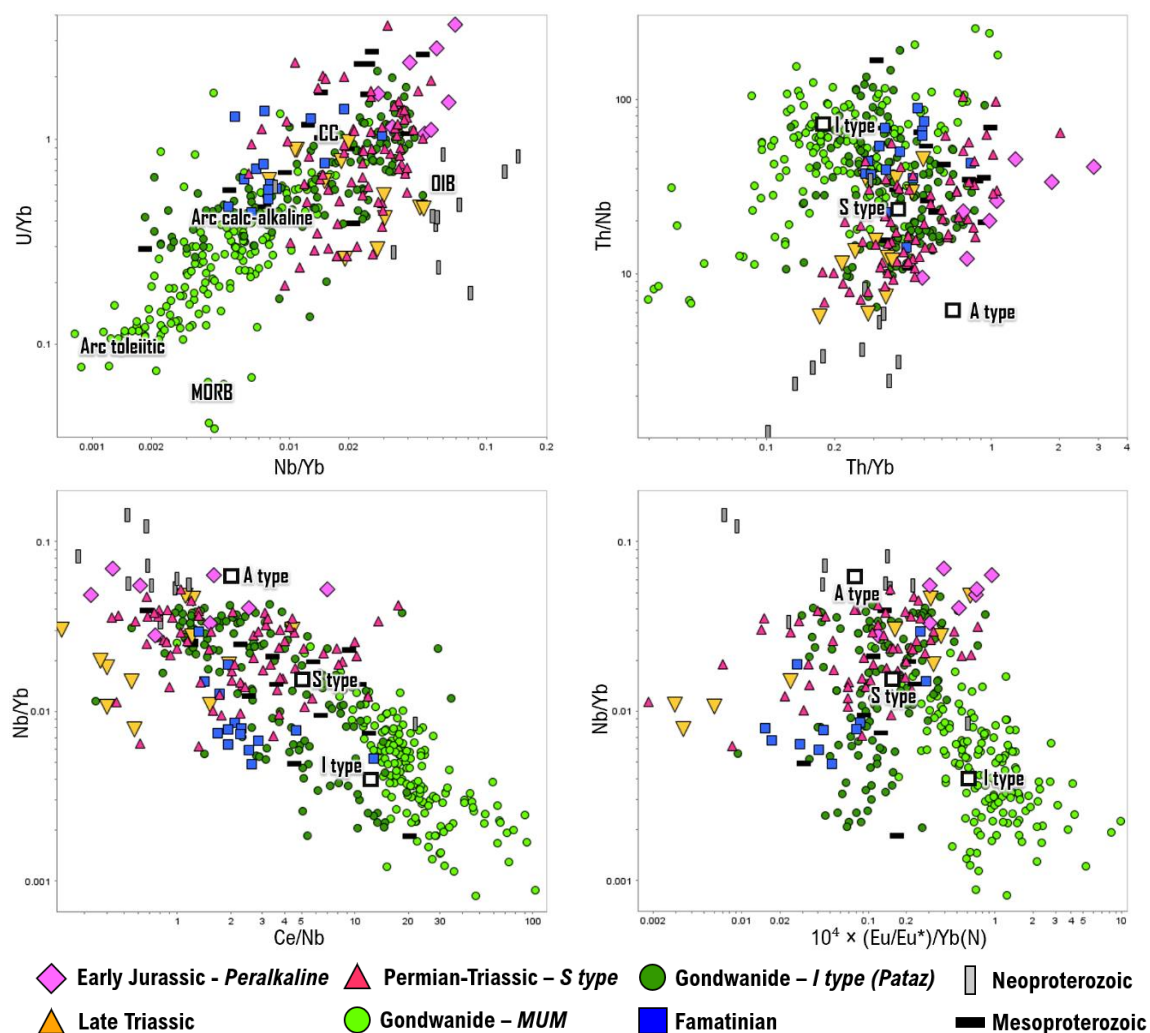


Fig. 19. Zircões dos gabros de Nikolauz indicam magmas calco-alcalinos de arco, oxidantes e hidratados, com forte influência crustal e empobrecimento em Nb. Em contraste, zircões jurássicos e triássicos exibem maior diversidade geoquímica, com assinaturas peralcalinas e dos tipos A e S, menor aporte crustal e ampla variação redox e hídrica. Dados de Miskovic (2008), Angerer (2018) e deste estudo.

5.3. Diferenças entre as intrusões de Nikolauz e as da Cordilheira Oriental.

Os A geoquímica dos zircões dos gabros da intrusão Nikolauz foi analisada em detalhe e comparada com outros conjuntos magmáticos previamente documentados na Cordilheira Oriental (Miskovic, 2009; Angerer et al., 2018). Essa comparação posiciona os dados de Nikolauz dentro de um quadro regional mais amplo da evolução magmática da Cordilheira Oriental, integrando parâmetros físico-químicos do magma (temperatura e fugacidade de oxigênio), relações de aporte mantélico–cortical e proxies de hidratação (Figs. 19–21).

5.3.1 Assinaturas e populações de zircões da Cordilheira Oriental

Os eventos magmáticos representados por zircões do Neoproterozoico, Triássico e Jurássico Inferior agrupam-se no campo de magmas tipo A, caracterizados por valores baixos de Ce/Nb (<1.5), $10^4 \times (Eu/Eu^*)/Yb_n$ (<0.5) e altos de Nb/Yb (>0.01). Essas assinaturas geoquímicas refletem condições reduzidas, baixos teores de H_2O e uma fonte alcalina com influência cortical moderada a limitada. Em contraste, o magmatismo gondwânico de Patáz exibe uma marcada dispersão composicional, mas mantém traços consistentes com magmas tipo I, definidos por Ce/Nb elevados (>5.0), Nb/Yb baixos (<0.03) e $(Eu/Eu^*)/Yb_n$ igualmente baixos (<0.5). Essas características denotam condições oxidadas, magmas calco-alcalinos com baixo teor de água e uma contribuição cortical significativa. Os zircões do Mesoproterozoico, Famatiniano e Permo-Triássico mostram composições intermediárias entre as famílias previamente descritas, com Ce/Nb entre ~ 1 e 10 e valores muito baixos de $(Eu/Eu^*)/Yb_n$ (<0.2). Essas proporções refletem magmas relativamente reduzidos e extremamente secos, em muitos casos compatíveis com magmas tipo S ou tipo I com forte aporte cortical.

Dentro desse quadro comparativo, as unidades gondwânicas MUM — representadas aqui por zircões de gabros— destacam-se por seus baixos valores de Nb/Yb , U/Yb e Th/Yb , juntamente com razões elevadas de Th/Nb , Ce/Nb e $10^4 \times (Eu/Eu^*)/Yb_n$. Essa combinação indica condições claramente

oxidadas, com elevada hidratação e marcada interação cortical. Nesse cenário, os gabros de Nikolauz distribuem-se sistematicamente nos campos típicos de magmas calco-alcálinos de arco, gerados a partir de fontes empobrecidas em Nb e desenvolvidos sob condições de alta oxidação e elevada atividade de H_2O . Esses parâmetros sustentam a interpretação de que o sistema magmático de Nikolauz se originou em um ambiente de subducção com significativa contribuição cortical, em concordância com a geoquímica própria de um evento máfico-ultramáfico gondwânico pós-compressional (Fig. 19).

5.3.2 Variação temporal de FMQ e proxy de H_2O

Os proxies de zircões revelam uma marcada evolução temporal nas condições redox e de hidratação dos magmas. As amostras mais antigas, correspondentes ao Mesoproterozoico e parte do Neoproterozoico, apresentam predominantemente valores próximos ao buffer FMQ e proxies hídricos notavelmente baixos, sugerindo magmas essencialmente secos, vinculados a contextos de proto-subducção (Mesoproterozoico) e ambientes intraplaca (Neoproterozoico). Durante o evento famatiniano, o magmatismo caracteriza-se por assinaturas extremamente secas e valores redox nitidamente reduzidos ($\Delta FMQ < 0$), consistentes com contextos fortemente compressivos e deformacionais.

Uma mudança significativa observa-se no evento gondwânico, quando os zircões registram uma transição para condições mais oxidantes ($\Delta FMQ > 0$) e fortemente hidratadas, evidenciada por valores elevados e consistentes de $10^4 \times (Eu/Eu^*)/Yb_n$. Essa tendência atinge seu máximo nos zircões de Nikolauz, no intervalo 315–305 Ma, com uma população densa de grãos que exibem valores de ΔFMQ entre +0.5 e +2.5, com média próxima a $\Delta FMQ \approx +1$, acompanhados de proxies hídricos extremamente altos. Esses padrões são coerentes com magmas calco-alcálinos gerados em um arco de subducção oxidante.

Em etapas posteriores, como no Permo-Triássico, reconhece-se uma tendência em direção a condições menos oxidadas, com valores redox médios próximos ao buffer FMQ e proxies hídricos fortemente empobrecidos,

compatíveis com um regime pós-orogênico ou de relaxamento tectônico. A consolidação desse evento pode ser associada ao desenvolvimento do vulcanismo Mitu (~245–220 Ma), caracterizado por um magmatismo extensivo de afinidade intraplaca. Finalmente, no Jurássico Inferior, posterior ao evento Mitu, os zircões registram um magmatismo extremamente reduzido, ainda que com um leve incremento do indicador de hidratação, sugerindo a persistência de um regime extensional e a transição de magmas tipo S para tipo A (Fig. 21).

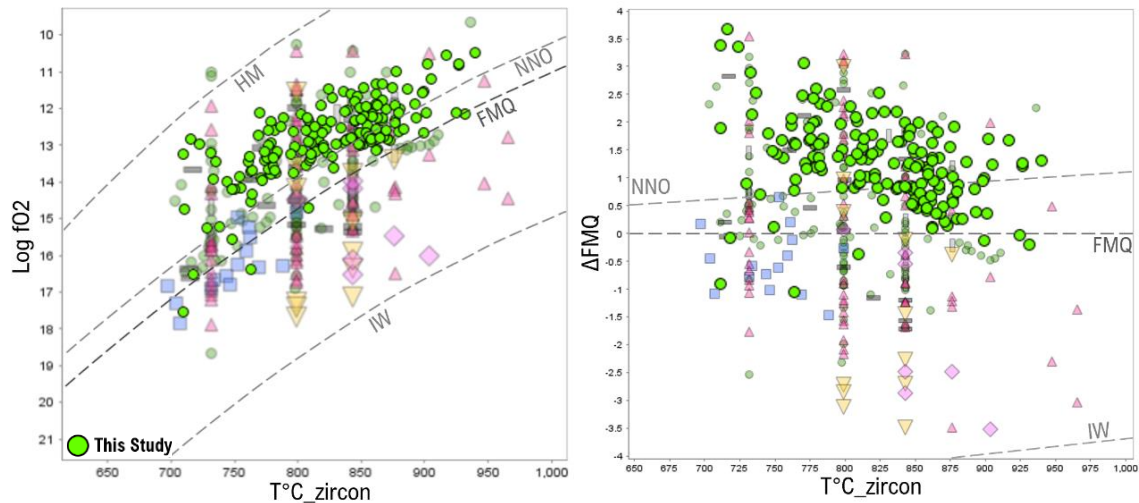


Fig. 20. Zircões dos gabros de Nikolauz registram temperaturas de 780–875 °C e alta fugacidade de oxigênio ($\Delta\text{FMQ} \approx +0,5$ a $+2,5$), indicando magmas calco-alcalinos, hidratados e oxidantes.

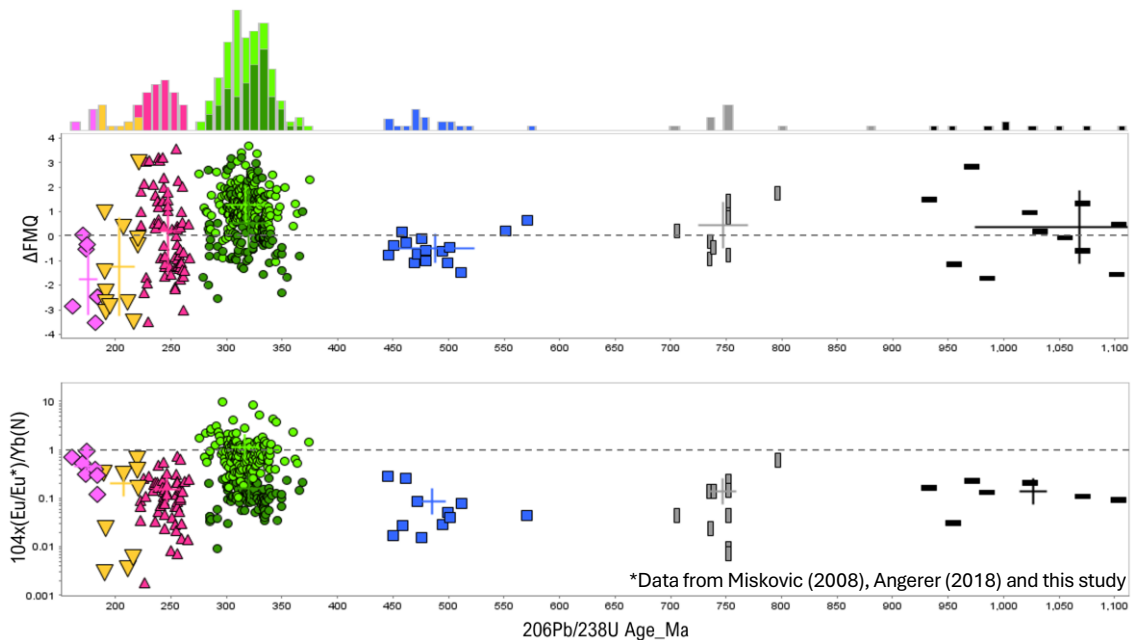


Fig. 21. Gráficos temporais de ΔFMQ e $10^4 \times (\text{Eu}/\text{Eu}^*)/\text{Yb}_n$ em zircões destacam a assinatura oxidante e hidratada dos gabros de Nikolauz, reforçando sua origem calco-alcalina de arco. Em contraste, zircões famatinianos e proterozóicos mostram condições magmáticas mais secas e redutoras, refletindo diferenças na evolução tectono-magmática ao longo do tempo. Dados de Miskovic (2008), Angerer (2018) e deste estudo.

CAPÍTULO VI: Sistema de Conduto Máfico-Ultramáfico das Intrusões de Nikolauz: Implicações para a Gênese de Sulfetos de Ni-Cu em Contexto Gondwânico da Cordilheira Oriental do Peru

6.1 Discussões

6.1.1 Sistema de conduto dinâmico em ambiente orogênico

Sistemas magmáticos de conduto dinâmico, caracterizados por magmas máfico-ultramáficos de alta temperatura, facilitam a segregação de sulfetos por meio da incorporação de enxofre crustal, criando condições ótimas para a formação de depósitos de Ni-Cu (Naldrett, 1998, 2011; Naldrett e Lightfoot, 1999; Barnes e Maier, 1999; Barnes et al., 2016). O termo “sistemas dinâmicos” refere-se a sistemas magmáticos abertos, nos quais cristais fluem através de condutos com pulsos recorrentes de recarga, acumulando-se dentro de intervalos composicionais restritos e mantendo um equilíbrio estável entre cristalização e recarga (Glazner et al., 2004; Coleman et al., 2004; Ariskin et al., 2018). Em contraste, sistemas fechados formam-se em um único evento de alojamento magmático, evoluindo apenas por cristalização fracionada in situ, o que os torna menos favoráveis ao acúmulo de sulfetos de Ni-Cu (Wager e Brown, 1968; Namur et al., 2015; Latypov et al., 2020).

As rochas de sistemas abertos tendem a ser mais homogêneas em composição e dominadas por cumulos de olivina–cromita–piroxênio. Devido às recargas magmáticas constantes e à dinâmica do magma, promovem o acúmulo de sulfetos por transporte mecânico em zonas intercumulus, tornando esses cumulos vetores-chave para a exploração de depósitos magmáticos (Cameron, 1978; Robertson et al., 2015; Barnes, 2023). Embora sistemas magmáticos dinâmicos com potencial econômico sejam tipicamente vinculados a Large Igneous Provinces (LIPs), o depósito Xiarihamu (157 Mt @ 0,65% Ni) demonstra que certos ambientes orogênicos também podem formar grandes depósitos de Ni-Cu (Li et al., 2015; Song et al., 2016; Song et al., 2020; He et al., 2022). Nesse contexto, as unidades ultramáficas do Peru, tradicionalmente consideradas fragmentos ofiolíticos (Misión Española, 1983; Castroviejo et al., 2009; Rodríguez et al., 2010; Tassinari et al., 2011), não se destacavam inicialmente como

potenciais para o desenvolvimento de depósitos magmáticos de sulfetos de Ni-Cu. Contudo, estudos recentes da intrusão máfico-ultramáfica de Nikolauz, em Chinchao-Huánuco, identificaram e caracterizaram um sistema magmático de conduto dinâmico nos Andes, hospedado nas sequências metassedimentares do Complexo Marañón.

A estrutura magmática de Nikolauz foi interpretada a partir de mapeamento de campo, petrografia, geoquímica e dados de sondagem. Esta intrusão máfico-ultramáfica compreende múltiplos pulsos de magma primitivo quente que formaram rochas ultramáficas cortando uma intrusão tubular composta por gabros. Essas rochas ultramáficas diferenciam-se concêntricamente para o exterior, passando de um núcleo de dunito adcumulate, a uma estreita zona de transição peridotito-piroxenito e, finalmente, a gabros na margem externa. As unidades ultramáficas centrais contêm cúmulos de olivina-cromita de granulação mais grossa (~0,4–0,3 mm), gradando para o exterior em cúmulos de olivina-ortopiroxênio e piroxênio, com cúmulos de piroxênio-plagioclásio mais finos (~0,1 mm) nas margens (Fig. 15). Esses padrões refletem maior fluxo e temperatura nas fácies canalizadas, promovendo a acumulação de olivina no núcleo do conduto, enquanto a diminuição do fluxo e da temperatura nas margens favorece cúmulos mais evoluídos. A intrusão segue uma geometria tubular de conólito, semelhante a Nebo-Babel e Limoeiro (Barnes et al., 2016; Mota-e-Silva et al., 2013), com transição de núcleos dunitíticos amplos para margens diferenciadas progressivamente estreitas (Fig. 23).

Cada intrusão ultramáfica exhibe tendências de diferenciação semelhantes; entretanto, apenas alguns apresentam características de fertilidade geoquímica (e.g., $\text{Cu/Zr} > 100$, $\text{Ni/MgO} > 50$), as quais estão estreitamente associadas a unidades de dunito enriquecidas em sulfetos. Essas zonas consistem principalmente em dunito adcumulate de granulação média, onde a mineralização de Ni-Cu ocorre como disseminações intercumulus, blebs ou sulfetos em textura de rede, incluindo pirrotita, pentlandita e calcopirita. Essas feições indicam segregação de sulfetos por líquidos imiscíveis dentro de magmas máfico-ultramáficos (Naldrett, 2004). Após a segregação, os líquidos imiscíveis circulam nos espaços intercumulus, concentrando-se em armadilhas estruturais

onde o fluxo magmático é interrompido. Todas essas características distinguem a intrusão Nikolauz de um sistema magmático fechado ou de um fragmento ofiolítico. Em vez disso, corresponde claramente a um sistema magmático de conduto dinâmico hospedado na Cordilheira Oriental dos Andes peruanos.

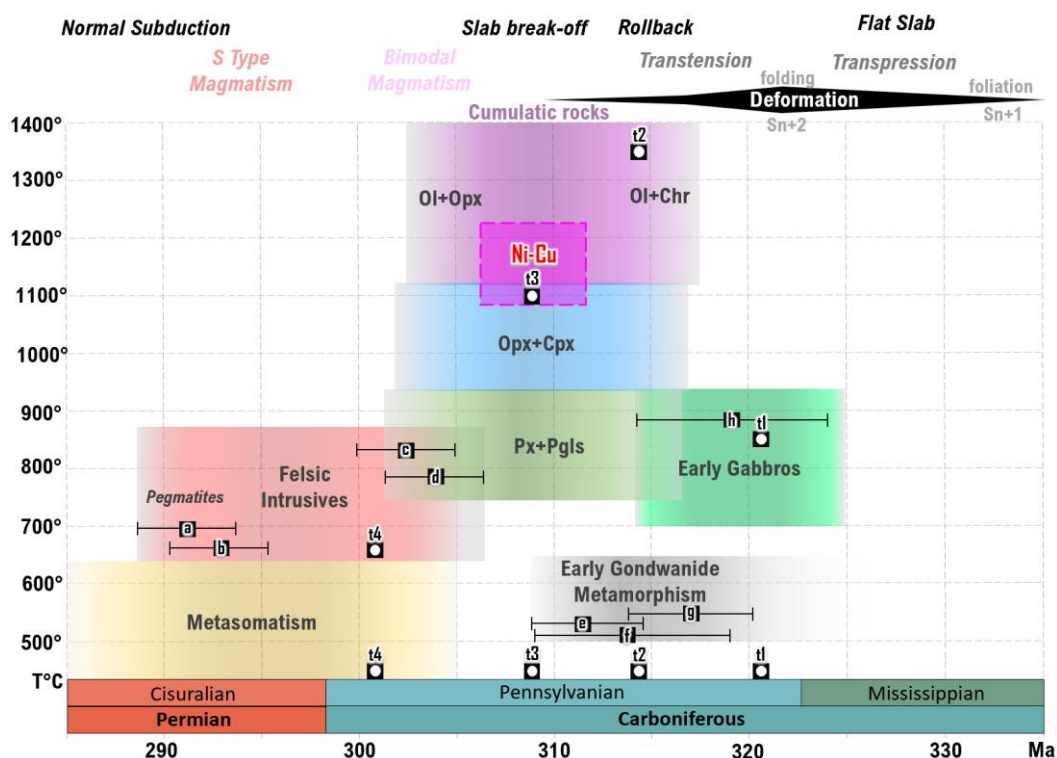


Fig. 22. Diagrama tempo–temperatura mostra que os gabros de Nikolauz (~315–305 Ma, 850–1150 °C) se formaram em contexto pós-compressional, com fases cumuláticas e mineralização Ni-Cu. Magmatismo félsico, metamorfismo e deformação gondwânica ocorrem em distintos domínios térmicos. As idades geocronológicas são provenientes de Cardona (2006) para os granitoides (a, b, c, d), de Miskovic (2009) para o metamorfismo (e, f, g), e as idades dos gabros (Nikolauz) fazem parte deste estudo.

6.1.2. Ambiente magmático e magma parental

A intrusão máfico-ultramáfica de Nikolauz, caracterizada por pulsos cumuláticos, apresenta rochas máfico-ultramáficas com valores de Mg# entre 65 e 90. As composições calculadas para o magma parental mostram teores de MgO de 11.58% e TiO₂ de 0.42%. De acordo com as relações MgO–TiO₂ desenvolvidas por Pearce e Reagan (2019), essas composições são consistentes com uma composição boninitica. A composição calculada da olivina mais primitiva em equilíbrio com esse magma parental tem conteúdo de forsterita de 89 mol%, comparável às composições de olivina mantélica segundo Zhang et

al. (2017). As rochas máfico-ultramáficas dessa intrusão são enriquecidas em LREE (e.g., La) e empobrecidas em Nb e Ti. Além disso, as razões [La/Sm]_{PM}, Nb/Yb e Th/Yb aumentam a partir de composições primitivas, enquanto [Nb/Th]_{PM} diminui, alcançando uma assinatura semelhante à da crosta superior. Embora padrões similares possam ser observados em magmas mantélicos de outras origens afetados por contaminação crustal, a presença de um magma parental boninitico com características cálcio-alcálinas sugere que esses magmas se formaram em um ambiente relacionado à subducção, com altas temperaturas de fusão mantélica que assimilaram fortemente material crustal durante a ascensão. Adicionalmente, o cálculo de V/Sc tanto em rocha total quanto no fundido inicial, seguindo Cawthorn et al. (1991), e a aplicação da equação $\Delta\text{FMQ}_{\text{Liq}}$ de Shishkina et al. (2018), permitiram estimar uma fugacidade de oxigênio para o magma parental de FMQ + 2.6. Esse estado de oxidação, por sua vez, possibilitou a estimativa do grau de fusão parcial (F%) por extrapolação das relações apresentadas por Lee et al. (2005), resultando em valores de F próximos a ~18.0%.

As rochas ultramáficas exibem conteúdos de elementos do grupo da platina (EGP) semelhantes aos de rochas de arco (e.g., Arco Magmático Russo, Kutyrev et al., 2021), com concentrações de Pd e Pt em rocha total notavelmente mais baixas do que as tipicamente relatadas para magmas komatiíticos ou picríticos, em concordância com o esperado para magmas nesse contexto tectônico (Barnes et al., 2015). As rochas ultramáficas da intrusão de Nikolauz são marcadamente enriquecidas em Ni e Cu, com sulfetos magmáticos ocorrendo como disseminações, blebs e agregados em rede dentro dos cumulos de olivina. Esse enriquecimento resulta da combinação de um grau relativamente alto de fusão parcial (F: ~18%) e de condições de oxidação elevadas (FMQ + 2.6), que em conjunto teriam favorecido a assimilação de Ni e Cu do manto para o magma e mantido esses metais em solução durante a ascensão magmática até a crosta superior. Essa condição impede a formação precoce de sulfetos em níveis crustais profundos, favorecendo a saturação em sulfetos em níveis mais rasos, onde sistemas magmáticos dinâmicos se desenvolvem (Cao et al., 2019, 2020). As rochas máfico-ultramáficas de Nikolauz apresentam valores de Mg# variando de 90 a 65, com uma queda acentuada nos

valores de V/Sc à medida que o Mg# diminui, sugerindo redução magmática através de processos de diferenciação. O intervalo crítico é Mg#: 84 ± 2.5 , onde as olivinas mostram enriquecimento significativo em Fe^{2+} , criando as condições mais favoráveis para a saturação em sulfetos. É precisamente nesse intervalo que se observa o maior enriquecimento em mineralização de sulfetos de Ni-Cu (Fig. 13D). O zoneamento da estrutura magmática exhibe fácies cumuláticas de olivina espessas e relativamente homogêneas, acompanhadas por fácies cumuláticas mais finas e diferenciadas em direção às margens. Essa estratigrafia cumulática reflete um padrão de fluxo de calor consistente com magmas de alta temperatura e um grau significativo de fusão mantélica. Nesse contexto, magmas boniniticos poderiam ter assimilado um conteúdo crustal substancial devido às altas temperaturas da fusão parcial do manto, ocorrida após rápida descompressão subsequente a um evento de subducção compressiva (após o pico da deformação gondwânica). O magma mantélico nessas condições provavelmente era de natureza piroxenítica, o que teria favorecido o enriquecimento em Ni e Cu no sistema magmático de Nikolauz.

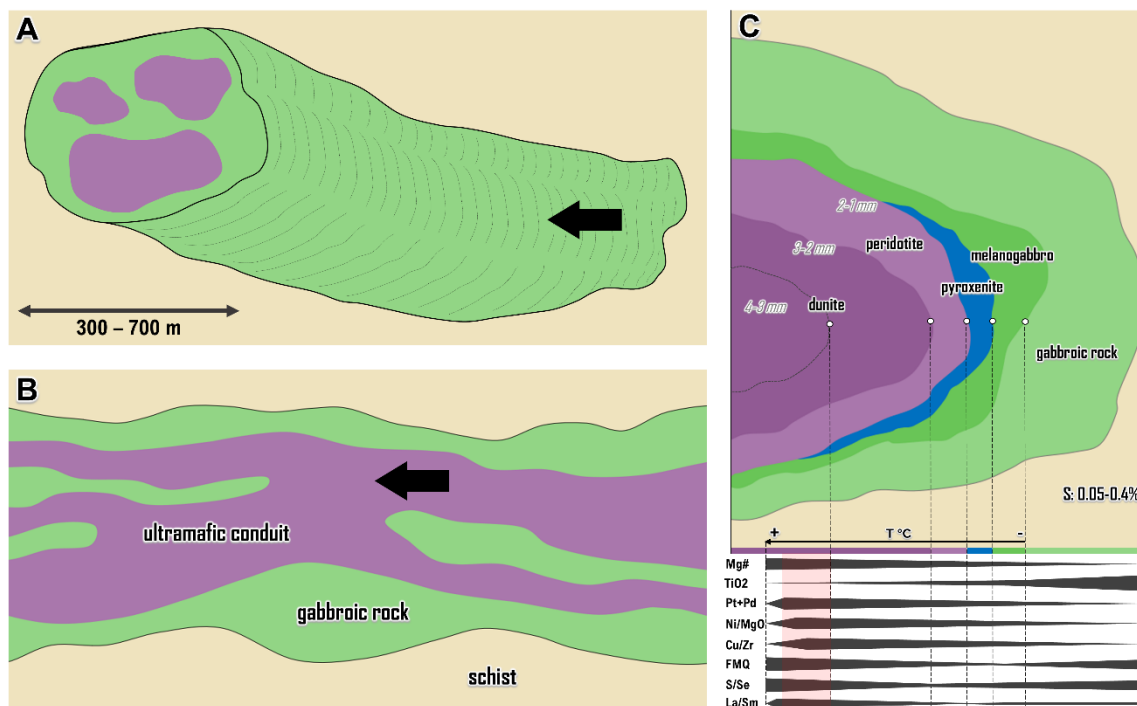


Fig. 23. Representação esquemática do conduto magmático dinâmico de San José. (A) Chonólito tubular constituído por um corpo gabroico cortado por pulsos cumuláticos primitivos. (B) Vista longitudinal do conduto dinâmico de San José, ilustrando o fluxo lateral de material ultramáfico. (C) Zoneamento composicional esquemático de um pulso cumulático ultramáfico, destacando variações em direção às margens associadas à diferenciação magmática e ao resfriamento progressivo. Indicadores geoquímicos-chave também estão representados.

6.1.3 Gênese dos sulfetos de Ni-Cu na intrusão de Nikolauz

Na região de Huánuco, a principal deformação Sn, vinculada à orogenia Famatiniana do Ordoviciano, é registrada como foliações regionais de direção NNE nas unidades de xistos do Complexo Marañón. Na localidade de Chinchao, foliações Sn+1 com orientação dominante NW e traços axiais de dobras ligados a Sn+2 foram atribuídos à orogenia Gondwânica (Cardona, 2006). Essa orogenia, ativa durante o Devoniano Médio, foi caracterizada por subducção ortogonal, com seu componente compressivo intensificando-se progressivamente até o Carbonífero Inferior (Miskovic et al., 2009). A intrusão gabroica precoce, caracterizada por corpos de chonólitos tubulares, exhibe foliações concordantes com os xistos encaixantes e intrude preferencialmente os núcleos de dobras sinclinais. Essas intrusões mostram foliações geneticamente ligadas à deformação Sn+2, que provavelmente atingiu seu auge durante as taxas máximas de convergência da orogenia Gondwânica, impulsionadas por subducção oblíqua de baixo ângulo e regime transpressivo (Fig. 22).

Um evento metamórfico subsequente no Pensilvaniano Inicial-Médio (Chew et al., 2016; Cardona, 2006) coincide com a diminuição da deformação tectônica, atribuída a um aumento no ângulo de subducção que favoreceu processos de rollback. Essa mudança reduziu as forças compressivas, induziu descompressão crustal e facilitou a ascensão de material derivado do manto, promovendo intrusões máfico-ultramáficas. Essas intrusões estão geneticamente ligadas a um magma parental boninitico, gerado sob condições de ~18% de fusão parcial, fugacidades de oxigênio altamente oxidantes (FMQ + 2,6) e uma fonte mantélica piroxenítica. Esse cenário sugere um evento de slab break-off durante o Pensilvaniano Médio, que teria facilitado a ascensão de material astenosférico quente, aumentando significativamente as condições térmicas e a fusão mantélica, em paralelo às interpretações para o depósito Xiarihamu (Liu et al., 2018). As condições de alta oxidação, provavelmente intensificadas pelo elevado conteúdo de H₂O no magma, podem ter promovido o acúmulo e a separação de líquido sulfetado, otimizando a formação de sulfetos de Ni-Cu (Mota e Silva, 2011). A fusão parcial afetou principalmente os piroxênios, que fundem em temperaturas mais baixas do que a olivina, deixando

a olivina na fase sólida residual. Consequentemente, foram gerados magmas mantélicos enriquecidos em componentes derivados de piroxênio. A fonte piroxenítica, intrinsecamente enriquecida em Ni e Cu, provavelmente desempenhou papel fundamental no gatilho da saturação em sulfetos, em processo análogo ao observado em Xiarihamu (He et al., 2022). Esse magma mantélico ascendeu até a crosta inferior, assimilando enxofre crustal durante sua migração. Ao atingir seu limite de fluatibilidade, escoou lateralmente ao longo de estruturas máficas pré-existentes, formando condutos dinâmicos.

Os pulsos cumuláticos exibem geometria e zoneamento distintivos, refletindo a direção do fluxo magmático. Nas fácies canalizadas, com maiores velocidades de fluxo e temperaturas, favorece-se o acúmulo de olivina, enquanto fácies marginais, com menores velocidades e temperaturas, levam a assembleias cumuláticas mais fracionadas. A mineralização de Ni-Cu na intrusão de Nikolauz foi controlada pela concentração mecânica de sulfetos dentro de um fluxo magmático canalizado, no qual o líquido rico em metais percolou através de cumulos de olivina e se acumulou em fácies ultramáficas específicas. A presença de sulfetos de Ni-Cu em texturas em rede, blebby e disseminados intercumulus em dunito (~3.0 mm de granulação, Mg#: 84 ± 2.5) indica concentração de sulfetos sob condições específicas de velocidade de fluxo e temperatura. Em sistemas magmáticos dinâmicos como este, sulfetos maciços podem ocorrer em zonas discretas próximas a condutos alimentadores ou armadilhas estruturais, onde os sulfetos se separam fisicamente do magma silicático. A intrusão de granitoides e pegmatitos nas unidades máfico-ultramáficas sugere que o magma piroxenítico de alta temperatura induziu fusão crustal, gerando magmatismo félsico em estágios posteriores. Essas intrusões provavelmente foram determinantes na condução de alteração hidrotermal, modificando alguns sulfetos e imprimindo uma assinatura geoquímica distintiva (Fig. 24, Fig. 25). Intrusões graníticas e zonas de alteração hidrotermal semelhantes foram documentadas em depósitos econômicos de Ni-Cu em ambientes orogênicos, como Xiarihamu (Han et al., 2020), reforçando sua importância em sistemas magmáticos de Ni-Cu associados a contextos orogênicos.

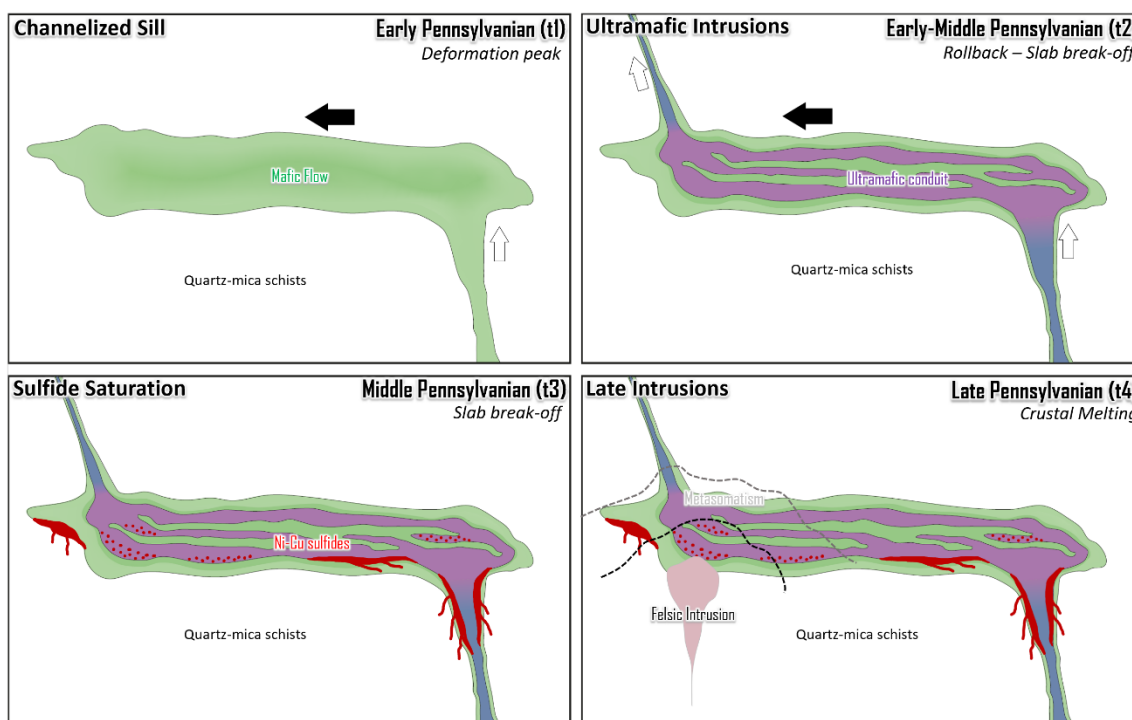


Fig. 24. Seção longitudinal esquemática ilustrando o modelo intrusivo para o conduto ultramáfico hospedeiro de sulfetos de Ni-Cu em San José. O modelo evolui através de estágios distintos que refletem tanto a dinâmica magmática quanto a resposta da crosta hospedeira: (t1) o emplazamento inicial de magmas máficos não cumuláticos em forma de sill canalizado, associado ao pico de deformação crustal; (t2) a ascensão de magmas derivados de fontes piroxeníticas, associada a rollback/slab break-off, o que promoveu circulação térmica intensa e o desenvolvimento de fluxos boniníticos cristalizando no interior da estrutura canalizada; (t3) o avanço da fracionamento, acompanhado por resfriamento progressivo e condições redox mais redutoras, que levaram à saturação em sulfetos de Ni-Cu e à formação de mineralizações localizadas ao longo do conduto; (t4) finalmente, o calor magmático sustentado induziu fusão parcial da crosta, resultando em intrusões félsicas tardias e em episódios de metasomatismo, configurando um regime de magmatismo bimodal típico de sistemas pós-colisionais.

6.1.4 Exploração de depósitos orogênicos de Ni-Cu no Peru

A evidência de um sistema magmático dinâmico com sulfetos de Ni-Cu em Nikolauz, juntamente com outras intrusões máfico-ultramáficas mineralizadas nas rochas metassedimentares do Marañón, reforça o potencial metalogenético de Ni-Cu não apenas em Huánuco, mas em toda a Cordilheira Oriental. O Complexo Marañón apresenta características-chave para ser considerado um cinturão de alto potencial para hospedar intrusões magmáticas de sulfetos de Ni-Cu.

Do ponto de vista estrutural, a intrusão de Nikolauz está situada no limite entre a Cordilheira Oriental e a zona Subandina (orientação andina), dentro de um sistema profundo de falhas ortogonais (orientação transandina), sugerindo controle estrutural por interseções de falhas de primeira e segunda ordem. Em nível greenfield, a geoquímica de sedimentos de corrente pode detectar de forma eficaz anomalias e associações Cr-Mg-Ni-EGP, contrastando com a assinatura típica de Si-Th-K-Zr das rochas do Complexo Marañón. Considerando que as unidades máfico-ultramáficas de Nikolauz se alojam ao longo de dobras axiais das foliações xistosas, o mapeamento de foliações em escala distrital pode auxiliar na delimitação de zonas favoráveis para intrusões.

O mapeamento geológico, integrado à análise geoquímica, é essencial para definir estruturas intrusivas potenciais, identificar partes das intrusões com acúmulo de fases cumuláticas e delinear zonas de enriquecimento em sulfetos de Ni-Cu. Isso pode ser refinado por meio da metodologia litogeoquímica de Barnes (2023) para depósitos de Ni-Cu-Co em intrusões magmáticas. Barnes e Lightfoot (2005) destacam que os depósitos magmáticos de sulfetos de Ni-Cu em condutos dinâmicos estão principalmente associados a pequenas intrusões máfico-ultramáficas, onde líquidos sulfetados são transportados pelo magma e precipitam em armadilhas dinâmicas. Esse modelo aprimora tanto o entendimento genético quanto as estratégias de exploração.

Entretanto, o pequeno porte dos depósitos maciços de sulfetos de Ni-Cu apresenta desafios exploratórios, tornando essenciais os levantamentos geofísicos de alta resolução. Os levantamentos magnetométricos são particularmente eficazes na detecção de corpos ultramáficos, já que intrusões dunitíticas serpentinizadas exibem fortes contrastes magnéticos em relação às rochas do Marañón. Levantamentos eletromagnéticos terrestres são comumente usados para detectar sulfetos maciços e definir alvos de sondagem, especialmente em terrenos LIP próximos a margens cratônicas com topografia relativamente plana. Em contraste, os terrenos acidentados andinos impõem desafios logísticos e potenciais distorções de sinal, tornando os levantamentos eletromagnéticos aéreos uma alternativa viável, embora mais limitada em termos de profundidade de investigação. Outra opção mais frequentemente utilizada nos

Andes são os levantamentos de IP, amplamente aplicados para detectar tanto sulfetos maciços quanto alvos metálicos disseminados, embora suas respostas devam ser interpretadas com cautela em áreas onde magnetita de granulação fina resultante de serpentinização possa contribuir para o sinal.

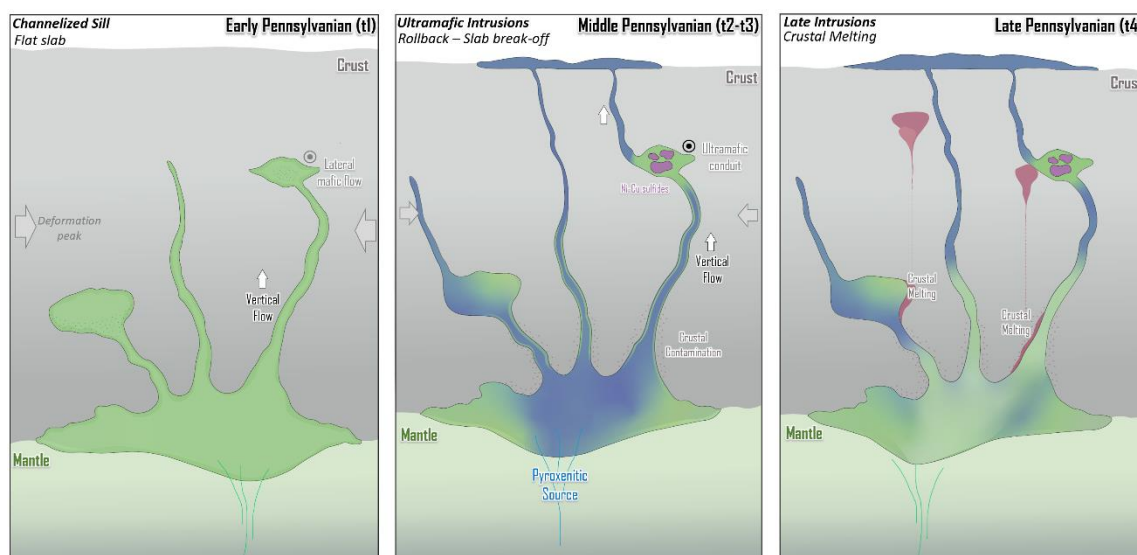


Fig. 25. Modelo tectono-magmático esquemático ilustrando a formação da mineralização de sulfetos de Ni-Cu no sistema magmático dinâmico de San José. i. Pennsylvânico inicial: Magmas máficos de origem peridotítica ascendem verticalmente pela crosta, sendo canalizados em um sistema de sills superiores, estabelecendo a arquitetura fundamental do conduto. ii. Pennsylvânico médio: Um evento de slab break-off promove a ascensão de magmas derivados de uma fonte mantélica piroxenítica, gerando magmas parentais boniníticos. O aporte térmico associado desencadeia circulação dinâmica, com fluxos laterais ultramáficos no sill, criando condições favoráveis à saturação e segregação de sulfetos de Ni-Cu. iii. Pennsylvânico tardio: O calor sustentado induz fusão crustal significativa, originando a intrusão de magmas félsicos tardios, refletindo magmatismo bimodal e marcando o estágio final da evolução cortical.

6.2 Conclusões

As principais conclusões deste trabalho são as seguintes:

1. A intrusão máfico-ultramáfica de Nikolauz representa o primeiro sistema magmático dinâmico com mineralização de sulfetos de Ni-Cu formalmente documentado na Cordilheira Oriental orogênica dos Andes Peruanos.

2. As intrusões máficas de Nikolauz estão localizadas entre o sistema de falhas de direção andina que marca o limite da Cordilheira Oriental e uma falha oblíqua de direção NW. Elas são discordantes em relação à foliação famatiniana de direção NNE e, em escala local, ocorrem como massas tubulares com foliações NW concordantes às rochas xistosas encaixantes, intrudindo preferencialmente os núcleos de dobras sinclinais.

3. Pulsos magmáticos primitivos de Nikolauz intrudem os gabros foliados precoces como fluxos canalizados, movimentando-se dinamicamente através do conduto magmático. Isso gera um amplo centro de fácies cumuláticas de olivina em áreas de maior velocidade e temperatura de fluxo, com fácies mais fracionadas nas margens, onde velocidade e temperatura do fluxo diminuem.

4. A mineralização de Ni-Cu na intrusão de Nikolauz é controlada por processos de concentração mecânica de sulfetos, nos quais o líquido rico em metais percolou através dos cumulos de olivina e se acumulou em fácies ultramáficas específicas. Sulfetos em rede, blebs e disseminações intercumulus associados a rochas de dunito primitivo de granulação média (~3.0 mm) indicam que essa concentração ocorreu durante as fases mais quentes e dinâmicas do fluxo magmático.

5. A alta fugacidade de oxigênio calculada para o magma parental (FMQ + 2.6) permitiu que o enxofre permanecesse em solução na forma de sulfato, prevenindo a formação prematura de sulfetos e promovendo seu acúmulo em níveis crustais superiores. Isso criou condições ótimas para que o sistema magmático dinâmico concentrasse de forma eficaz sulfetos de Ni-Cu.

6. A saturação em sulfetos na intrusão máfico-ultramáfica de Nikolauz foi influenciada pelo controle redox e por processos de fracionamento de magma ultramáfico que aumentaram as concentrações de Fe^{2+} (estado reduzido) nas olivinas, favorecendo a formação de sulfetos de Ni-Cu nos intervalos críticos de Mg# ($\sim 84 \pm 2.5$).

7. A intrusão máfico-ultramáfica de Nikolauz apresenta evidências convincentes de assimilação substancial de enxofre crustal, refletidas em razões elevadas de Nb/Yb–Th/Yb e altos valores de S/Se. Observações de campo revelam a presença de xisto grafitoso dentro do Complexo Marañón, que provavelmente atuou como fonte adicional de enxofre, complementando outras contribuições crustais que coletivamente desempenharam papel crítico no desencadeamento e intensificação da mineralização de sulfetos de Ni-Cu dentro da intrusão.

8. O magmatismo cúmulo máfico-ultramáfico apresenta caráter calco-alcalino (MgO/FeOt: 0.5–0.8; La > Nb; Th/Yb: 0.1–10; [Nb/Th]_{PM} < 1), condições oxidantes (Δ FMQ entre +0.5 e +2.5; média $\approx$ +1.1) e elevado teor de H₂O, de acordo com proxies geoquímicos em zircões (e.g., $10^4 \times (\text{Eu}/\text{Eu}^*)/\text{Yb}_n$).

9. O magma parental das rochas cumuláticas máfico-ultramáficas de Nikolauz apresenta composições boniniticas (MgO: 11.58%, TiO₂: 0.42%), é relativamente empobrecido em elementos do grupo da platina (EGP) e tem origem em uma fonte mantélica piroxenítica, a qual favoreceu o enriquecimento em Ni-Cu no sistema magmático.

10. O magmatismo máfico-ultramáfico desenvolveu-se em um contexto de slab break-off durante o Pensilvaniano Médio, logo após o declínio da componente compressiva e do metamorfismo Gondwânico (ca. 320 Ma), sendo registrado por idades U-Pb em zircões entre 305 e 323 Ma, com pico de cristalização em 314.1 Ma.

11. Os sulfetos magmáticos de Ni-Cu hospedados na intrusão máfico-ultramáfica de Nikolauz, localizada em Chinchao, Huánuco, representam um sistema magmático de conduto dinâmico em ambiente orogênico, abrindo novas oportunidades para a exploração desses sistemas com potencial para hospedar sulfetos magmáticos de Ni-Cu nos Andes da Cordilheira Oriental.

Referências

- Angerer, T., Kemp, A. I. S., Hagemann, S. G., Witt, W. K., Santos, J. O., Schindler, C., & Villanes, C., 2018. Source component mixing controls the variability in Cu and Au endowment along the strike of the Eastern Andean Cordillera in Peru. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173(36). doi.org/10.1007/s00410-018-1462-5
- Ariskin, A., Danyushevsky, L., Nikolaev, G., Kislov, E., Fiorentini, M., McNeill, A., Kostitsyn, Y., Goemann, K., Feig, S.T. and Malyshev, A., 2018, The Dovyren Intrusive Complex (Southern Siberia, Russia): insights into dynamics of an open magma chamber with implications for parental magma origin, composition, and Cu-Ni-PGE fertility. *Lithos* v. 302-303, p. 242–262, doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.001.
- Barnes, S.-J. and Maier, W.D., 1999, The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids. In: Keays, R.R., Lesher, C.M., Lightfoot, P.C., Farrow, C.E. G. (Eds.), *Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and their Application to Mineral Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes 13: p. 69–106.
- Barnes, S. J., Cruden, A. R., Arndt, N. and Saumur, B. M., 2016, The mineral system approach applied to magmatic Ni–Cu–PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 76, p. 296-316, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.012.
- Barnes, S.J., Mungall, J.E., Le Vaillant, M., Godel, B, Lesher, C. M., Holwell, D. Lightfoot, P.C., Krivolutsкая, N. and Wei, B., 2017, Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: disseminated and net-textured ores. *American Mineralogist*, v. 102, p. 473–506, doi.org/10.2138/am-2017-5754.
- Barnes, S. J., Staude, S., Le Vaillant, M., Piña, R. and Lightfoot, P. C., 2018, Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: Massive, semi-massive and sulfide-matrix breccia ores. *Ore Geology Reviews*, v. 101, p. 629-651, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.011.
- Barnes, S.-J. and Lightfoot, P.C., 2005, Formation of magmatic nickel sulfide deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P. (eds) *Economic Geology 100th Anniversary*, Society of Economic Geologists, Littleton, CO, v. 1905–2005, p. 179–213, doi.org/10.5382/AV100.08.
- Barnes, S. J., Mungall, J. E. and Maier, W. D., 2015, Platinum group elements in mantle melts and mantle samples. *Lithos*, v. 232, p. 395-417, doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.007.
- Barnes, S. J., 2023, Lithogeochemistry in exploration for intrusion-hosted magmatic Ni–Cu–Co deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 2023, Article Geochem2022-025, v. 1, p. 23, doi.org/10.1144/geochem2022-025.

Bédard, J. H. (2006). Trace element partitioning in plagioclase feldspar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 70, no 15, p. 3717–3742. doi.org/10.1016/j.gca.2006.05.003

Belousova, E.A., Griffin, E.W.L., O'Reilly, S.Y., Fischer, N.I., 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.* 143, 602–622. doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7

Cao, Y., Wang, C. Y. and Wei, B., 2019, Magma oxygen fugacity of Permian to Triassic Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in the central Asian orogenic belt, North China. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 173, p. 250-262, doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.01.024.

Cao, Y., Wang, C. Y. and Wei, B., 2020, Magma oxygen fugacity of mafic-ultramafic intrusions in convergent margin settings: Insights for the role of magma oxidation states on magmatic Ni-Cu sulfide mineralization. *American Mineralogist*, v. 105, no. 12, p. 1841–1856, doi.org/10.2138/am-2020-7351.

Cardona, A., Cordani, U.G., Ruiz, J., Valencia, V., Nutman, A.P. and Sanchez, A., 2006, U/Pb Detrital Zircon Geochronology and Nd Isotopes from Paleozoic Metasedimentary Rocks of Marañon Complex: Insights on the Proto-Andean Tectonic Evolution of the Eastern Peruvian Andes. In: *Fifth South American Symposium on Isotope Geology*, short papers, p. 208 – 211.

Castroviejo, R., Pereira, E., Rodrigues, J. F., Acosta, J. and Espi, J. A., 2009, Pre-Andean serpentinite-chromite orebodies in the Eastern Cordillera of Central Peru, Tarma Province. *Proc. Tenth Bienn. SGA Meeting (Society for Geology Applied to Mineral Deposits)*, Townsville, Australia, p. 927-929.

Campbell, I. H. and Naldrett, A. J., 1979, The influence of silicate:sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides. *Economic Geology*; v. 74, no. 6, p. 1503–1506, doi.org/10.2113/gsecongeo.74.6.1503.

Cameron, E.N., 1978, The lower zone of the eastern Bushveld Complex in the Oliphants River Trough. *Journal of Petrology*, v. 19, p. 437–462, doi.org/10.1093/petrology/19.3.437.

Cawthorn, R.G., Meyer, P.S. and Kruger, F.J., 1991, Major addition of magma at the Pyroxenite Marker in the Western Bushveld Complex, South Africa. *Journal of Petrology* v. 32, p. 739–763, doi.org/10.1093/petrology/32.4.739

Chew, D.M., Schaltegger, U., Miškovic, A., Fontignie, D. and Frank, M., 2005, Deciphering the tectonic evolution of the Peruvian segment of the Gondwanan margin. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), Extended Abstracts, p. 166–169, fdi:010040198.

Chew, D.M., Magna, T., Kirkland, C.L., Miskovic, A., Cardona, A., Spikings, R. and Schaltegger, U., 2008, Detrital zircon fingerprint of the Proto-Andes: evidence for a Neoproterozoic active margin? *Precambrian Research* v. 167, p. 186–200, doi.org/10.1016/j.precamres.2008.08.002.

Chew, D. M., Pedemonte, G. and Corbett, E., 2016, Proto-Andean evolution of the Eastern Cordillera of Peru. *Gondwana Research*, v. 35, p. 59-78, doi.org/10.1016/j.gr.2016.03.016.

Coleman, D.S., Gray, W., and Glazner, A.F., 2004, Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California: *Geology*, v. 32, p. 433–436, doi.org/10.1130/G20220.1.

Dalmayrac, B., 1970, Mise en évidence d'une chaîne anté-ordovicienne et probablement précambrienne dans la Cordillère orientale du Pérou central (région de Huanuco). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série D: Sciences Naturelles*, v. 270, no. 8, p. 1088-1091, hdl.handle.net/20.500.12544/3761.

Dalmayrac, B., Laubacher, G., Marocco, R., 1980, Caractères généraux de l'évolution géologique des Andes Péruviennes. *Géologie des Andes Péruviennes*, ORSTOM, Paris, v. 122, p. 501, hdl.handle.net/20.500.12544/331.

Dunn, T., 1987, Partitioning of Hf, Lu, Ti, and Mn between olivine, clinopyroxene and basaltic liquid. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 96, no. 4, p. 476–484, doi.org/10.1007/BF01166692.

Ernst, R. E., 2014, Large Igneous Provinces (LIPs). Cambridge University Press, doi.org/10.1017/CBO9781139025300.

Ernst, R. E. and Jowitt, S. M., 2013, Large Igneous Provinces (LIPs) and Metallogeny. *Society of Economic Geologists Special Publication*, v. 17, no.2, p. 15-51, doi.org/10.5382/SP.17.02.

Ferreira Filho, C.F., Naldrett, A.J., and Gorton, M.P., 1998, REE and pyroxene compositional variation across the Niquelândia layered intrusion, Brazil: Petrological and metallogenetic implications: *Applied Earth Sciences: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, v. 107, p. 1–22, orcid.org/0000-0002-7698-3459.

Gao, J., John, T., Klemd, R., & Xiong, X., 2007, Mobilization of Ti–Nb–Ta during subduction: Evidence from rutile-bearing dehydration segregations and veins hosted in eclogite, Tianshan, NW China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 71, no. 20, p. 4974–4996. doi.org/10.1016/j.gca.2007.07.027

Grandin, G. and Zegarra, J., 1979, Las rocas ultrabásicas en el Perú; Las intrusiones lenticulares y los sills de la región Huánuco – Monzón. *Bol. Soc. Geol. Peru*, v. 63: p. 99 – 115.

Grimes, C. B., Wooden, J. L., Cheadle, M. J., & John, B. E., 2015. “Fingerprinting” tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170(46). doi.org/10.1007/s00410-015-1199-3

Guillon, J. H. and Zegarra, J., 1977, Las mineralizaciones Ni-Cu asociadas a los cuerpos de rocas ultrabásicas de la Cordillera Andina Oriental Del Perú. Estudio de la Zona Piloto de Chinchao (Dpto. de Huánuco). Acción Conjunta ORSTOM-INGEOMIN, informe final, segunda parte, Lima, Perú.

Glazner A.F., Bartley J.M., Coleman D.S., Gray W. and Taylor R.Z., 2004, Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? *GSA Today* v. 14, no. 4/5, p. 4–11, doi.org/10.1130/1052-5173(2004)014<0004:APAOMO>2.0.CO;2.

Han, Y., Liu, Y. and Li, W., 2020, Mineralogy of Nickel and Cobalt Minerals in Xiarihamu Nickel–Cobalt Deposit, East Kunlun Orogen, China. *Frontiers in Earth Science*, 8, Article 597469, doi.org/10.3389/feart.2020.597469.

Hart, S.R., and Dunn, T., 1993, Experimental cpx/melt partitioning of 24 trace elements: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 113, p. 1–8, doi.org/10.1007/BF00320827.

Hauri, E.H., Wagner, T.P., and Grove, T.L., 1994, Experimental and natural partitioning of Th, U, Pb, and other trace elements between garnet, clinopyroxene, and basaltic melts: *Chemical Geology*, v. 117, p. 149–166, doi.org/10.1016/0009-2541(94)90126-0.

He, H-L., Chen, L-M., Song, X-Y., Fu, B., Yi, J-N., Yu, S-Y. and Deng, Y-F., 2022, Genesis of the Xiarihamu Magmatic Ni-Co Sulfide Deposit in the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau: In Situ Oxygen Isotope and Geochemical Perspectives. *Economic Geology*; v. 117, no. 8, p. 1827–1844, doi.org/10.5382/econgeo.4949.

Hoskin, P.W.O., Black, L.P., 2000, Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology* 18, 423 – 439. doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x

Latypov, R. M., Chistyakova, S. Yu., Namur, O. and Barnes, S., 2020, Dynamics of evolving magma chambers: textural and chemical evolution of cumulates at the arrival of new liquidus phases. *Earth-Science Reviews*, v. 210, 103388. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103388.

Lee, C.T., Leeman, W. P., Canil, D. and Li, Z.X., 2005, Similar V/Sc Systematics in MORB and Arc Basalts: Implications for the Oxygen Fugacities of their Mantle Source Regions. *Journal of Petrology*, v. 46, p. 2313-2336. doi.org/10.1093/petrology/egi056.

Lee C.-T., Luffi P., Chin E.J., Bouchet R., Dasgupta R., Morton D.M., Le Roux V., Yin Q.-Z. and Jin, D., 2012, Copper systematics in arc magmas and implications for crust-mantle differentiation. *Science* v. 336, p. 64–68, doi/10.1126/science.1217313.

Leshner C.M., 2019, Up, down, or sideways: emplacement of magmatic Fe-Ni-Cu-PGE sulfide melts in large igneous provinces. *Can J Earth Sci* v. 56, p. 756–773, doi.org/10.1139/cjes-2018-0177.

Li, C., Zhang, Z., Li, W., Wang, Y., Sun, T. and Ripley, E. M., 2015, Geochronology, petrology and Hf–S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni–Cu sulfide deposit in the Qinghai–Tibet plateau, western China. *Lithos*, v. 216–217, p. 224–240, doi.org/10.1016/j.lithos.2015.01.003.

Li, Z.X. and Lee, C.T., 2004, The constancy of upper mantle fO₂ through time inferred from V/Sc ratios in basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 228, p. 483–493, doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.006.

Li, C. and Ripley, E.M., 2011, The giant Jinchuan Ni–Cu–(PGE) deposit: tectonic setting, magma evolution, ore genesis and exploration implications. *Reviews in Economic Geology* 17, 163–180.

Liu, Y., Li, W., Jia, Q., Zhang, Z., Wang, Z., Zhang, Z., Zhang, J. and Qian, B., 2018, The Dynamic Sulfide Saturation Process and a Possible Slab Break-off Model for the Giant Xiarihamu Magmatic Nickel Ore Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau, China. *Economic Geology*, v. 113, no. 6, p. 1383–1417, doi.org/10.5382/econgeo.2018.4596.

Loader, M. A., Nathwani, C. L., Wilkinson, J. J., & Armstrong, R. N., 2022. Controls on the magnitude of Ce anomalies in zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 328, 242–257. doi.org/10.1016/j.gca.2022.03.024

Lu, Y., Leshner, C. M. and Deng, J., 2019, Geochemistry and genesis of magmatic Ni-Cu-(PGE) and PGE-(Cu)-(Ni) deposits in China. *Ore Geology Reviews*, v. 107, p. 863–887, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.03.024.

McLaughlin, D.H., 1924, Geology and Physiography of the Peruvian Cordillera, Departments of Junin and Lima. *Geological Society of America Bulletin*, v. 35, no. 3, p. 591–632, doi.org/10.1130/GSAB-35-591.

Mao, Y., Qin, K., Barnes, S. J., Ferraina, C., Iacono-Marziano, G., Verrall, M., Tang, D. and Xue, S., 2017, A revised oxygen barometry in sulfide-saturated magmas and application to the Permian magmatic Ni–Cu deposits in the southern Central Asian Orogenic Belt. *Mineral Deposita*, v. 53, p. 731–755, doi.org/10.1007/s00126-017-0771-3.

Manor, M. J., Piercey, S. J., & Wall, C. J., 2024. Zircon and the role of magmatic petrogenesis in the formation of felsic-hosted volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits: a case study from the mid-Paleozoic Yukon-Tanana terrane, northern Canadian Cordillera. *Mineralium Deposita*, 59, 341–371. doi.org/10.1007/s00126-023-01213-8

Martins, V. B. and Ferreira Filho, C. F., 2018, The Caboclo dos Mangueiros Deposit: Ni-Cu Sulfide Mineralization Hosted by an Ultramafic Intrusion in the

Northern Edge of the São Francisco Craton, Brazil. *Economic Geology*, v. 113, no. 7, p.1525–1552, doi.org/10.5382/econgeo.2018.4601.

Mégard, F., 1978, Etude géologique des Andes du Pérou Central. Contribution a l'étude géologique des Andes N° 1. Mémoire ORSTROM no. 86, p. 310, doi.org/10.4000/books.ifea.1450.

Misión Española, 1983, Reconocimiento geológico del area de reserva nacional Chinchao – Perú. Acuerdo Cooperación Minera Hispano Peruano.

Miskovic, A., 2008. Magmatic evolution of the Peruvian Eastern Cordilleran intrusive belt: insights into the growth of continental crust and tectonism along the proto-Andean Western Gondwana. Doctoral Thesis, Université de Genève. doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:2282

Mišković, A., Schaltegger, U., Spikings, R.A., Chew, D.M. and Košler, J., 2009, Tectono-magmatic evolution of western Amazonia: geochemical characterisation and zircon U–Pb geochronologic constraints from the Peruvian Eastern Cordilleran granitoids. *Geological Society of America Bulletin* v. 121, p. 1298–1324, doi.org/10.1130/B26488.1.

Mota-e-Silva, J. M., Ferreira Filho, C. F., Bühn, B. and Dantas, E. L., 2011, Geology, petrology and geochemistry of the “Americano do Brasil” layered intrusion, central Brazil, and its Ni–Cu sulfide deposits. *Miner Deposita*, v. 46, p. 57–90, doi.org/10.1007/s00126-010-0312-9.

Mota-e-Silva, J., Ferreira Filho, C.F. and Della Giustina, M.E.S., 2013, The Limoeiro deposit: Ni– Cu–PGE sulfide mineralization hosted within an ultramafic tubular magma conduit in the Borborema Province. Northeast. Braz. *Economic Geology*, v. 108, p. 1753–1771, doi.org/10.2113/econgeo.108.7.1753.

Mungall J.E. and Brenan J.M., 2014, Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantlecrust fractionation of the chalcophile elements. *Geochim Cosmochim Acta* v. 125, p. 265–289, doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.002.

Naldrett, A.J., 1998, World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis: *Mineralium Deposita*, v. 34, no.3, p. 227–240, doi:10.1007/s001260050200.

Naldrett, A.J. and Lightfoot, P.C., 1999, Ni-Cu-PGE deposits of the Noril'sk region, Siberia; their formation in conduits for flood basalt volcanism. In: Keays, R.R., Leshner, C.M., Lightfoot, P.C., Farrow, C.E.G. (Eds.), *Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and their Application in Mineral Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course, 13: p. 195–249.

Naldrett, A. J., 2004, *Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, doi.org/10.1007/978-3-662-08444-1

Naldrett, A., 2011, Fundamentals of magmatic sulfide deposits. Chapter 1 in: *Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry and Genesis*. Li, C. and Ripley, E. M. *Reviews in Economic Geology*, v. 17, p. 1–50, doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00198.x

Namur, O., Higgins, M.D. and Vander Auwera, J., 2015, The Sept Iles Intrusive Suite, Quebec, Canada. In: Charlier, B., Namur, O., Latypov, R., Tegner, C. (Eds.), *Layered Intrusions*, 1st ed. Springer, p. 465–515, doi.org/10.1007/978-94-017-9652-1_11.

Loucks, R. R., & Fiorentini, M. L., 2023. Oxidation of magmas during gain and loss of H₂O recorded by trace elements in zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 622, 118377. doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118377

Loucks, R. R., Fiorentini, M. L., & Henriquez, G. J., 2020. New magmatic oxybarometer using trace elements in zircon. *Journal of Petrology*, 61(9), egaa034. doi.org/10.1093/petrology/egaa034

Loucks, R. R., Henriquez, G. J., & Fiorentini, M. L., 2024. Zircon and whole-rock trace-element indicators of magmatic hydration state and oxidation state discriminate copper ore-forming from barren arc magmas. *Economic Geology*, 119(3). doi.org/10.5382/econgeo.5071

Pearce, J. A., 2008, Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, v. 100, no. 1–4, p. 14–48, doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016

Pearce, J.A., and Reagan, M.K., 2019, Identification, classification, and interpretation of boninites from Anthropocene to Eoarchean using Si-Mg-Ti systematics. *Geosphere*, v. 15, no. 4, p. 1008-1037, doi.org/10.1130/GES01661.1.

Piña, R., Romeo, I., Ortega, L., Lunar, R., Capote, R., Gervilla, F., Tejero, R. and Quesada, C., 2010, Origin and emplacement of the Aguablanca magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, SW Iberia: A multidisciplinary approach. *Geological Society of America Bulletin*, v. 122, p. 915–925, doi.org/10.1130/B30046.1.

Queffurus, M. and Barnes, S.-J., 2015, A review of sulfur to selenium ratios in magmatic nickel–copper and platinum-group element deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 69, p. 301-324, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.019.

Robertson, J.C., Barnes, S.J. and Le Vaillant, M., 2015, Dynamics of magmatic sulphide droplets during transport in silicate melts and implications for magmatic sulphide ore formation. *Journal of Petrology*, v.56, p. 2445–2472, doi.org/10.1093/petrology/egv078.

Rodrigues, J.F., Acosta, J., Macharé, J., Pereira, E. And Castroviejo, R., 2010, Evidencias estructurales de aloctonía de los cuerpos ultramáficos y máficos de la Cordillera Oriental del Perú en la Región de Huánuco. *Simpósio S3_Bloques Litosféricos de la Cadena Andina*. In: XV Congreso Peruano de Geología.

Rosas, S., Fontboté, L. and Tankard, A., 2007, Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru. *Journal of South American Earth Sciences* v. 24, p. 1–24, doi.org/10.1016/j.jsames.2007.03.002.

Shishkina, T.A., Portnyagin, M.V., Botcharnikov, R.E., Almeev, R.R., Simonyan, A.V., Garbe-Schönberg, D., Schuth, S., Oeser, M. and Holtz, F., 2018, Experimental calibration and implications of olivine-melt vanadium oxybarometry for hydrous basaltic arc magmas. *American Mineralogist*, v. 103, p. 369–383, doi.org/10.2138/am-2018-6210.

Song, X. Y., Wang, K. Y., Barnes, S. J., Yi, J. N., Chen, L. M. and Schoneveld, L. E., 2020, Petrogenetic insights from chromite in ultramafic cumulates of the Xiarihamu intrusion, northern Tibet Plateau, China. *American Mineralogist*, v. 105, no. 4, p. 479–497, doi.org/10.2138/am-2020-7222.

Song, X.Y., Yi, J.N., Chen, L.M., Yu, S.Y., Liu, C.Z., Dang, X.Y., Yang, Q.A. and Wu, S.K., 2016, The Giant Xiarihamu Ni-Co Sulfide Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China. *Economic Geology*, v. 111, p. 29–55, doi.org/10.2113/econgeo.111.1.29

Sossi, P. A., Eggins, S. M., Nesbitt, R. W., Nebel, O., Hergt, J. M., Campbell, I. H., O'Neill, H. St.C., Van Kranendonk, M., and Davies, D. R., 2016, Petrogenesis and Geochemistry of Archean Komatiites. *Journal of Petrology*, v. 57, no. 3, p. 1–38, doi.org/10.1093/petrology/egw004.

Spikings, R., Reitsma, M.J., Boekhout, F., Mišković, A., Ulianov, A., Chiaradia, M., Gerdes, A. and Schaltegger, U., 2016, Characterisation of Triassic rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea, *Gondwana Research*, v. 35, p. 124–143, doi.org/10.1016/j.gr.2016.02.008.

Sproule, R. A., Sutcliffe, R., Tracanelli, H. and Lesher, C. M., 2007, Palaeoproterozoic Ni–Cu–PGE mineralisation in the Shakespeare intrusion, Ontario, Canada: a new style of Nipissing gabbro-hosted mineralisation. *Applied Earth Science*, v. 116 no. 4, p. 188–200, doi.org/10.1179/174327507X207492.

Sun, C. and Liang, Y., 2013, The importance of crystal chemistry on REE partitioning between mantle minerals (garnet, clinopyroxene, orthopyroxene, and olivine) and basaltic melts. *Chemical Geology*, v. 358, p. 23–36, doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.08.045.

Tassinari, C.C.G., Castroviejo, R., Rodrigues, J.F., Acosta, J. and Pereira, E., 2011, A Neoproterozoic age for the chromitite and gabbro of the Tapo ultramafic massif, Eastern Cordillera, Central Peru and its tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences* v. 32, p. 429–437, doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.008.

Wager, L.R. and Brown, G.M., 1968, *Layered Igneous Rocks*. Oliver and Boyd, Edinburgh and London.

Wilson, J. and Reyes, L., 1964, Geología del cuadrángulo de Patáz (Hoja 16-h). Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín, v. 9, p. 91. hdl.handle.net/20.500.12544/169.

Zhang, H., Tang, Q., Li, C., Wang, Y. and Ripley, E. M., 2017, Sr-Nd-Os-S isotope and PGE geochemistry of the Xiarihamu magmatic sulfide deposit in the Qinghai–Tibet plateau, China. *Miner Deposita*, v. 52, p. 51–68, doi.org/10.1007/s00126-016-0645-0.

Zheng, Y.-F., 2019, Subduction zone geochemistry. *Geoscience Frontiers*, v. 10, no.4, p. 1223–1254. doi.org/10.1016/j.gsf.2019.02.003

Zhong, S. H., Liu, Y., Li, S. Z., Bindeman, I. N., Cawood, P. A., Seltnmann, R., Niu, J. H., Guo, G. H., & Liu, J. Q., 2023. A machine learning method for distinguishing detrital zircon provenance. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 178(35). doi.org/10.1007/s00410-023-02017-9

Anexos

Anexo 1. Resumo petrográfico das rochas máfico-ultramáficas do Projeto Nikolauz

<i>Lithology</i>	<i>Ilmenitic gabbro</i>	<i>Vary-textured gabbroic rock</i>	<i>Tremolitite</i>	<i>Tremolite serpentinite</i>	<i>Serpentinite</i>	<i>Mineralized serpentinite</i>
<i>Unit</i>	Gabbroic rock	Gabbroic rock	Pyroxenite	Peridotite	Dunite	Mineralized dunite
<i>Grain size (mm)</i>	1.0 - 2.0	1.0 - 8.0	2.0-5.0	1.0 - 3.0	1.0 - 4.0	3.0 - 4.0
<i>Magmatic texture</i>	equigranular	orthocumulate, vary texture	orthocumulate, mesocumulate	adcumulatic, mesocumulate	adcumulatic	adcumulatic
<i>Deformation fabric</i>	moderately - strong foliated	moderately - weakly foliated	weakly foliated	weakly foliated	usually non-foliated	usually non-foliated
<i>Primary minerals</i>	plagioclase, pyroxene	plagioclase, pyroxene	pyroxene, plagioclase	olivine, pyroxene	olivine	olivine
<i>Minor mineral</i>	ilmenite, apatite, Fe-hydroxides	magnetite, titanite, apatite	-	-	chromite	chromite, sulfides
<i>Alteration minerals</i>	chlorite, sericite, carbonates, quartz	epidote, sericite chlorite	tremolite, actinolite, talc	serpentinite, magnetite,	serpentinite, magnetite	serpentinite, magnetite, secondary sulfides
<i>Alteration intensity</i>	moderate to weak	moderate to strong	moderate to strong	strong to moderate	strong to moderate	strong to moderate
<i>Magmatic sulfides</i>	—	—	—	—	—	pyrrhotite, pentlandite, chalcopyrite
<i>Ore texture</i>	—	—	—	—	—	blebby, disseminate, net-texture
<i>Cumulus minerals</i>	Non cumulus mineral	Pl-Px	Px-Pl	Ol-Px	Ol-Px-Chr	Ol-Px-Chr

Nota. Ol: olivina, Chr: cromita, Px: piroxênio, Pl: plagioclásio

Anexo 2. Geoquímica representativa das intrusões máfico-ultramáficas e das rochas encaixantes

<i>Sample</i>	<i>51769185</i>	<i>51770401</i>	<i>DDH-1443*</i>	<i>51770403</i>	<i>51770407</i>	<i>DDH-5491*</i>	<i>DDH-0841*</i>	<i>DDH-0341*</i>	<i>DDH-2498*</i>
<i>Lithology</i>	Quartz-mica schist	Alkali feldspar granite	Monzogranite	Ilmenitic gabbroic rock	Vary-textured gabbroic rock	Tremolitite	Tremolite serpentinite	Serpentinite	Mineralized serpentinite
<i>Unit</i>	Marañon Complex	Huanuco Granitoid	Chinchao Granitoid	Gabbroic rock	Gabbroic rock	Pyroxenite	Peridotite	Dunite	Mineralized dunite
<i>pct</i>									
<i>MgO</i>	0.47	0.61	1.72	2.56	6.41	17.66	31.18	38.21	36.34
<i>FeO</i>	1.11	2.52	4.23	5.88	3.91	8.52	9.94	14.90	16.66
<i>MnO</i>	0.03	0.03	0.09	0.09	0.07	0.13	0.14	0.22	0.19
<i>TiO2</i>	0.10	0.39	0.70	1.05	0.23	0.31	0.37	0.05	0.06
<i>Al2O3</i>	12.88	14.44	14.78	25.56	24.16	10.66	6.73	1.15	1.57
<i>CaO</i>	0.15	1.17	1.62	11.94	16.04	5.50	2.57	4.25	4.26
<i>SrO</i>	0.01	0.01	0.01	0.14	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01
<i>P2O5</i>	0.05	0.19	0.15	0.54	0.01	0.03	0.14	0.01	0.01
<i>K2O</i>	1.95	5.60	3.07	1.60	0.48	1.29	0.42	0.01	0.01
<i>BaO</i>	0.03	0.06	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
<i>Na2O</i>	3.58	2.83	2.02	2.76	1.04	0.29	0.39	0.02	0.03
<i>SiO2</i>	79.48	71.76	70.45	47.12	47.10	54.47	46.77	39.37	37.59
<i>ppm</i>									
<i>Cr</i>	14.4	15	105	12	287	1050	2390	4610	4140
<i>Co</i>	3.12	3.98	14.35	12.4	19.75	60.3	100	177.5	236
<i>V</i>	13	34	99	131	90	137	106	37	38
<i>Sc</i>	3.1	5.72	11.15	14.2	22	31.6	14.55	3.66	3.64
<i>Zr</i>	3.1	214	221	117	12	32	25	4	7
<i>Cs</i>	2.8	4.87	13	3.48	1.18	9.55	11	0.4	1.26
<i>Rb</i>	86	180.5	138	59.5	19.2	52.5	30.6	0.3	2
<i>Nb</i>	8.21	16.9	14	4.53	0.54	1.4	2.83	0.1	0.38
<i>Ta</i>	1.81	0.89	1.4	0.24	0.02	0.2	0.8	0.2	0.1
<i>Hf</i>	0.14	5.65	6.2	2.41	0.43	1.18	0.77	0.08	0.17
<i>Th</i>	2.39	16.65	12.6	0.26	0.05	0.73	0.38	0.05	0.95
<i>Y</i>	5.51	27.3	25.1	13.2	4.1	6.7	2.4	0.5	0.6
<i>Lu</i>	0.17	0.41	0.32	0.18	0.07	0.11	0.07	0.01	0.01
<i>La</i>	7.68	39.7	33.1	19.1	2.3	5.7	1.5	1.2	2.9
<i>Ce</i>	16.05	81.8	70.3	41	4.9	12.5	3.3	1.7	6.7
<i>Nd</i>	6.6	35.3	31.9	24.5	3.9	6.6	2.2	0.8	2.9
<i>Sm</i>	1.51	7.77	6.8	4.7	0.99	1.52	0.7	0.2	0.42
<i>Eu</i>	0.6	1.12	1.38	1.95	0.52	0.58	0.1	0.09	0.13
<i>Gd</i>	1.52	6.35	5.33	3.81	1.02	1.75	0.46	0.11	0.35
<i>Dy</i>	1.77	5.57	4.62	2.77	1.04	1.37	0.36	0.13	0.11
<i>Ho</i>	0.3	0.94	0.9	0.51	0.16	0.26	0.09	0.02	0.03
<i>Yb</i>	1.12	2.61	2.56	1.08	0.45	0.66	0.26	0.04	0.03

Nota: Óxidos, traços e REE por ICP-AES/MS; Se-Te-Bi por ICP-MS (ALS Global).

*** Amostras de sondagem sem profundidade especificada**

Anexo 3. Conteúdo metálico representativo das unidades máfico-ultramáficas de Nikolauz

<i>Sample</i>	<i>51770403</i>	<i>51770407</i>	<i>DDH-5491*</i>	<i>DDH-0841*</i>	<i>DDH-0341*</i>	<i>DDH-2498*</i>
<i>Lithology</i>	Ilmenitic gabbroic rock	Vary-textured gabbroic rock	Tremolitite	Tremolite serpentinite	Serpentinite	Mineralized serpentinite
<i>Unit</i>	Gabbroic rock	Gabbroic rock	Pyroxenite	Peridotite	Dunite	Mineralized dunite
<i>Ni (ppm)</i>	5.03	56.20	490.00	960.00	2000.00	4080.00
<i>Cu (ppm)</i>	11.30	19.95	122.00	125.50	486.00	1320.00
<i>Pd (ppb)</i>	0.20	0.20	1.80	3.40	6.90	7.30
<i>Pt (ppb)</i>	0.40	0.40	1.80	3.70	8.40	7.70
<i>S (pct)</i>	0.07	0.01	0.13	0.19	0.12	1.24
<i>Se (ppm)</i>	0.05	0.04	0.36	0.28	0.51	2.90
<i>Ni+Cu (ppm)</i>	16.33	76.15	612.00	1085.50	2486.00	5400.00
<i>Pd+Pt (ppb)</i>	0.60	0.60	3.60	7.10	15.30	15.00
<i>Ni/Cu</i>	0.45	2.82	4.02	7.65	4.12	3.09
<i>Pd/Pt</i>	0.50	0.50	1.00	0.92	0.82	0.95

Nota: Ni, Cu, S por ICP-AES/MS; Se por ICP-MS; Pd–Pt por ensaio ao fogo (ALS Global).

*** Amostras de sondagem sem profundidade especificada**

Anexo 4. Sumário da geocronologia U–Pb em zircões por LA-ICP-MS das intrusões máficas de Nikolauz e do granito de Huánuco

<i>Sample</i>	<i>Intrusion</i>	<i>Mg#</i>	<i>ΔFMQ</i>	<i>Longitud</i>	<i>Latitud</i>	<i>Lithology</i>	<i>zircon grains</i>	<i>Concordia age (Ma)</i>	<i>±2σ</i>	<i>MSWD</i>	<i>p(χ²)</i>	<i>Inheritance</i>	<i>±2σ</i>
51770401	Huanuco granitoid	29.64	-0.4755	-76.0209	-9.568	alkali feldspar granite	21	467.9	2.1	0.71	0.4	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	963.8	6.5
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1176	11
51770402	San Jose MUM	51.31	+1.4317	-76.016	-9.5926	gabbroic rock	27	323	3	0.78	0.38	-	-
51770403	San Jose MUM	43.66	+1.0751	-76.0188	-9.5903	ilmenitic gabbroic rock	43	312.2	3.2	0.0088	0.93	-	-
51770404	San Jose MUM	51.04	-0.2544	-76.0173	-9.5949	vary-textured gabbroic rock	5	305.3	5.7	0.0042	0.95	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	992	11
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1692	20
51770405	SW San Jose MUM	61.39	+0.8245	-76.0358	-9.6181	pyrite-rich gabbroic rock	35	315.2	5.4	0.077	0.78	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1074	23
51770406	SW San Jose MUM	37.96	+1.5768	-76.0536	-9.6304	leucogabbroic Rock	22	316.4	2.9	0.76	0.38	-	-
51770407	San Jose MUM	74.46	-1.03	-76.0169	-9.5933	vary-textured gabbroic rock	1	347	11	-	0.33	-	-
51770408	SW San Jose MUM	49.95	+2.0380	-76.0462	-9.6206	apatite-rich gabbroic rock	24	313.7	7.4	0.08	0.78	-	-

Nota: Todas as amostras apresentaram razões Th/U superiores a 0.3, confirmando a origem magmática dos zircões (Hoskin & Black, 2000; Belousova et al., 2002).

A fugacidade de oxigênio em zircões foi estimada pelo oxibarômetro de Loucks et al. (2020), usando a relação $\Delta\text{FMQ} = 3.997 \times \log[\text{Ce}/\sqrt{(\text{U} \cdot \text{Ti})}] + 2.272$.

Anexo 5. Manuscrito do trabalho.

Primeiro trabalho a ser submetido com os resultados obtidos na Dissertação de Mestrado

Geology and geochemistry of the Nikolauz mafic-ultramafic intrusions, Chinchao-Huánuco: evidence of a Ni-Cu sulfide mineralized conduit system in the orogenic Eastern Cordillera of the Peruvian Andes

Abraham Arana^{1,2}, Cesar Fonseca Ferreira Filho¹, Jonas Mota e Silva²

1 - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brazil

2 - Rio Tinto Mining and Exploration, Av. La Paz 1049, Oficina 503, Miraflores, Lima, Peru

Abstract

Orogenic environments are an underexplored search space for Ni-Cu-PGE deposits globally. The Nikolauz mafic-ultramafic intrusion, located in the Eastern Cordillera of Peru, is one of the few Ni-Cu sulfide-mineralized conduit systems reported within the Andean orogenic terrane. It forms elongated bodies, up to 4 km long, consisting of gabbroic rocks crosscut by ultramafic intrusions hosted in metamorphic schists of the Marañón Complex. Despite the pervasive alteration of igneous olivine-pyroxene-plagioclase, magmatic textures are largely preserved, revealing tubular bodies with well-developed zoning consisting of adcumulus dunite at the core, grading into peridotite, pyroxenite and gabbro towards the margins. Ni-Cu mineralization occurs within ultramafic rocks as sulfide disseminations, blebby textures, and net-textured aggregates. Whole-rock geochemistry ($\text{MgO} > 35 \text{ wt.}\%$, $\text{Cr} > 2500 \text{ ppm}$) and petrography indicate that the intrusion consists predominantly of variably altered olivine, pyroxene and plagioclase cumulates, with dunite as the principal ultramafic rock type. These rocks are enriched in chalcophile elements (Ni : 2500–6000 ppm; $\text{Pd}+\text{Pt}$: 20–150 ppb) and display elevated Cu/Zr (>100) and Ni/MgO (>50) ratios in sulfide-bearing rocks. Trace element geochemistry systematics reveal the ultramafic rocks have high LREE/MREE ratios ($\text{La/Sm} > 5$), while the mafic-ultramafic suite has a calc-alkaline affinity suite ($\text{MgO/FeO} = 0.5\text{--}0.8$; $\text{La} > \text{Nb}$; $\text{Th/Yb} = 0.1\text{--}10$; $[\text{Nb/Th}]_{\text{PM}} < 1$). The Nikolauz magmatism is linked with the Gondwanan event, as evidenced by its crosscutting relationship with the regional Famatinian foliations and the generation of its own local foliation, this indicates a late to post-compressional Gondwanan-related emplacement. Geological and geochemical evidence points to partial melting of a pyroxenitic mantle source during lithospheric decompression, likely triggered by slab break-off in the late stages of orogeny. The recognition of a dynamic, Ni-Cu sulfide-mineralized conduit system in a Paleozoic orogenic environment, now exposed in the Eastern Cordillera of Peru, underscores the potential for similar deposits in the Andean domain.

Keywords: Nikolauz intrusion, Ni-Cu sulfides, orogenic settings, trace element geochemistry.

Introduction

Magmatic sulfide deposits are widely understood to form from the accumulation of immiscible sulfide droplets segregated from mafic-ultramafic magmas originated in the mantle. These high-temperature magmas, characterized by high Ni-Cu-PGE contents, achieve conditions to form Ni-Cu-PGE magmatic deposits when they are part of a dynamic conduit system, which provide ideal pathways for transportation of silicate magmas and segregation, metal enrichment and accumulation of sulfide liquids. (e.g., [Naldrett, 2004](#); [Barnes and Lightfoot, 2005](#); [Barnes et al., 2016](#)). High amounts of mafic-ultramafic magma are generated by high degrees of partial melting of the mantle, generally associated with the impact of mantle plumes on the lithosphere. These conditions represent the best potential targets for magmatic sulfide deposits and are typically linked to Large Igneous Province (LIP), where the greater volumes of magmatic flow trigger a more dynamic environment (e.g., [Ernst, 2014](#); [Ernst and Jowitt, 2013](#); [Leshner, 2019](#)). Ni-Cu sulfide deposits in orogenic environments, such as Americano do Brasil, Aguablanca, Huangshandong, and Hongqiling, exhibit smaller sizes and lower grades compared to those found in Large Igneous Provinces ([Mota-e-Silva et al., 2011](#); [Piña et al., 2010](#); [Mao et al., 2017](#); [Lu et al., 2019](#)). However, the discovery of the Xiarihamu deposit (157 Mt at 0.65 wt.% Ni) in the Eastern Kunlun Paleozoic arc terrane (northern part of the Qinghai-Tibet Plateau in China) demonstrates that world-class Ni-Cu deposits can indeed form in orogenic environments under specific conditions ([Li et al., 2015](#); [He et al., 2022](#)). The recent demand of Ni and Co as critical metals to support the transition to cleaner energy renewed the interest in the exploration of magmatic deposits associated with mafic-ultramafic magmas. Orogenic environments underexplored for Ni-Cu-PGE deposits provide particularly important opportunities for greenfield exploration worldwide.

The first systematic study of Ni in the Peruvian Andes were carried out from 1974 to 1977 in a collaboration project of the Peruvian (INGEOMIN) and the French (ORSTOM) geological surveys. During this period, mafic-ultramafic bodies with minor associated Ni-Cu mineralization were recognized in sectors of the Eastern Cordillera, such as those in Chinchao, Tantamayo, Huancapallac, and Churubamba ([Guillon and Zegarra, 1977](#)). In the early 1980s, new studies focusing on the economic potential for Ni-Cu deposits in Chinchao-Huánuco were developed under a Spanish-Peruvian mining cooperation agreement. Nonetheless, these studies concluded that the investigated Ni-Cu anomalies result of sulfide segregation in ophiolitic fragments, interpreted as remnants of ancient oceanic crust ([Misión Española, 1983](#)). This genetic interpretation of the mafic-ultramafic units decreased the interest in exploration for magmatic deposits in the Eastern Cordillera, which continued to be interpreted as ophiolitic bodies in following studies (e.g., [Rodríguez, 2010](#)).

Looking for a new exploration search space, Rio Tinto started in 2021 a program to evaluate the potential for Ni-Cu-PGE deposits in the Peruvian Eastern Cordillera. Based on exploration data acquired in the Nikolauz mafic-ultramafic intrusions (MUM), which includes mapping, drilling and geochemical-geophysical surveys, they were re-interpreted as part of a complex magmatic system intruding metamorphic rocks of the Maraón Complex. This study presents the results leading to this new interpretation, including petrological features of the mafic-ultramafic intrusions hosting Ni-Cu sulfide mineralization. Our study highlights

compositional and textural variations throughout the intrusions, which consist of multiple dunite-peridotite rocks intruding gabbroic units. Finally, this paper proposes that the Ni-Cu sulfides of the Nikolauz MUM intrusions belong to a dynamic magmatic conduit system located in the orogenic environments of the Eastern Cordillera in the Peruvian Andes. These results highlight the potential for Ni-Cu deposits along the Eastern Cordillera, thus adding an extensive new prospective setting for orogenic magmatic sulfide deposits.

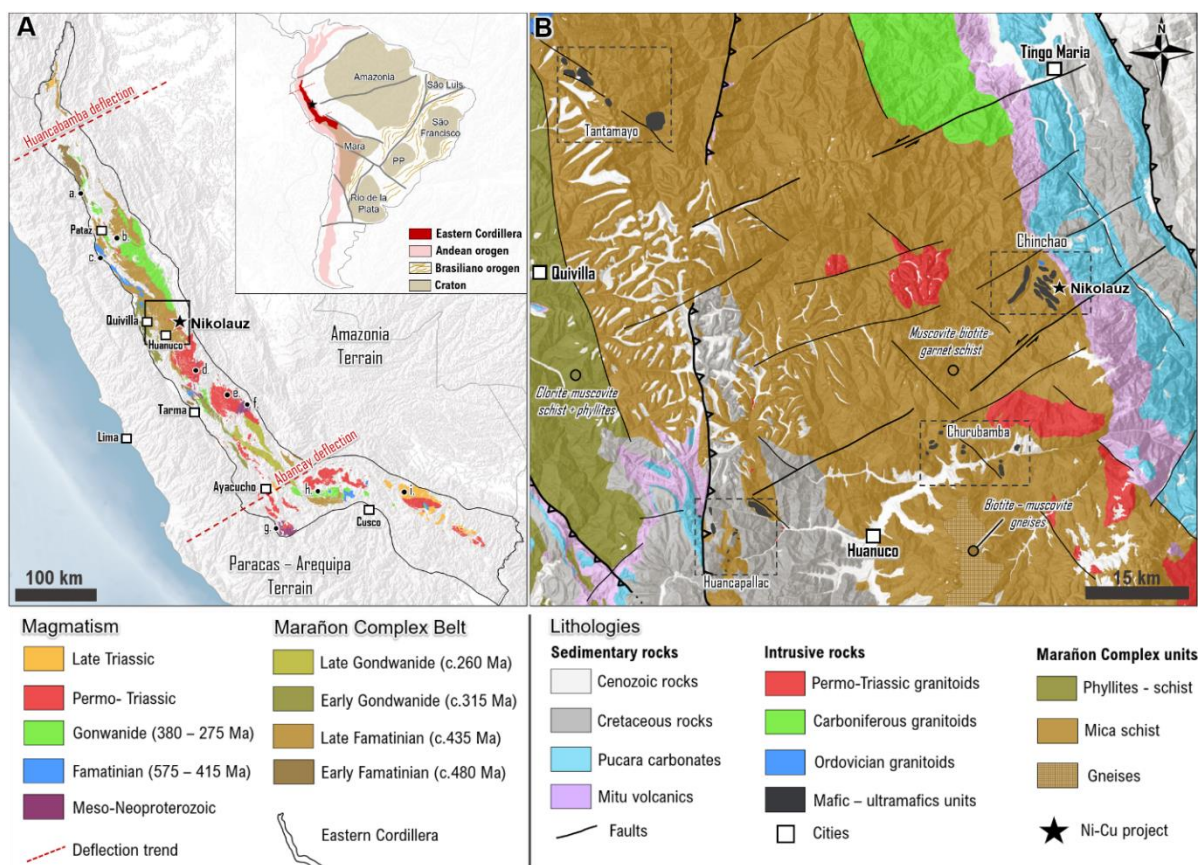


Fig. 1. (A) Simplified map showing the metamorphic sequences (Marañón Complex) and the main magmatic units of the Eastern Cordillera. The rectangle indicates the Huánuco region detailed in (B). Lower case letters indicate the magmatic units: a. Balsas–Callangate, b. Patáz, c. Sitibamba–Pomabamba, d. Huacapistana (Meso-Neoproterozoic), e. San Ramón, f. Meso-Neoproterozoic granitoid unit, g. Querobamba Complex, h. Gondwanide granitoid unit, i. Carabaya Cordillera. (B) Geological map of the Huánuco region, highlighting the Marañón Complex and intrusive units. The four clusters of mafic–ultramafic intrusions reported by Grüning and Zegarra (1979) are indicated. Figure 1A is partially modified from Chew et al. (2007, 2016) and Mišković (2009), and Figure 1B is adapted from geological data sources from Ingemmet (Peruvian Geological Survey).

Eastern Cordillera Geological Context

The Eastern Cordillera is primarily composed of metasediments belonging to the Marañón Complex (Fig. 1A), a metamorphic complex defined by [Wilson and Reyes \(1964\)](#) to describe the extensive sequence of metamorphic units in this region. Paleozoic-Mesozoic sedimentary rock overlies the Marañón complex that is crosscut by several pre-Jurassic felsic and mafic/ultramafic intrusions. The Eastern Cordillera is divided into three main zones: north, central, and south. The northern zone extends from the locality of Quivilla up to the Huancabamba deflection to the north; the central zone covers the region between Huánuco

and Ayacucho cities, while the southern zone is located to the south of the Abancay deflection (Fig. 1A). The northern Eastern Cordillera comprises Neoproterozoic low- to medium-grade metasediments affected by the Famatinian orogeny, with early metamorphism near the Huancabamba deflection (Chew et al., 2016). Igneous bodies include the Balsas, Callangate, and Pataz belt, dominated by granodiorites with subordinate granites, linked to the Carboniferous–Permian Gondwanan event (Mišković, 2009). On the western margin, the Sitabamba–Pomabamba Ordovician granodiorites of the Famatinian event were later metamorphosed into gneisses during the same tectonic episode (Chew et al., 2016). The central Eastern Cordillera near Huánuco consists of Neoproterozoic to early Paleozoic metasediments—quartz-mica schists, graphitic schists, gneisses, and amphibolites—of mainly medium grade, overprinted by late Famatinian and early Gondwanan metamorphism. South of Tarma, quartz-mica schists and phyllites record late Gondwanan metamorphism (Chew et al., 2016). The central igneous component is dominated by the Permian–Triassic San Ramón Batholith, with associated Famatinian and Gondwanan intrusions, where granitoids reached gneissic conditions in contact with deformed metasediments (Mišković et al., 2009). The southern Eastern Cordillera consists mainly of Paleozoic sedimentary rocks, with Neoproterozoic schists and gneisses of the Marañón Complex between Ayacucho and Cusco. Igneous intrusions include Famatinian–Gondwanan granitoids and the Permo–Triassic Cusco and Paucartambo batholiths. Southern areas host Late Triassic–Early Jurassic granitoids and syenitic–peralkaline intrusions, with Meso–Neoproterozoic units along contacts with Permo–Triassic bodies (Mišković, 2009).

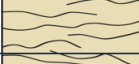
Chronology	Stratigraphy and lithological content		Units	
Jurassic	Lower		Limestones interbedded with dolomites and black shales layers	<i>Pucara</i>
Triassic	Upper		Limestones interbedded with dolomites and black shales layers	
	Middle		Mafic alkalines lavas interbedded with continental sandstones	<i>Mitu</i>
	Lower			
Devonian	Middle		Gray slates, clayey-organic phyllites and mica-quartz schist	<i>Younger Marañón</i>
	Lower		Quartz-mica schist and quartzite lenses	
Silurian	Upper		Quartz-mica schist and black schist lenses	
Neoproterozoic			Quartz-mica schist and quartzite lenses	<i>Older Marañón</i>
			Biotite-muscovite gneisses	

Fig. 2. Stratigraphic column of the metamorphic sequences of the Marañón Complex and the overlying sedimentary units (Mitu and Pucará Groups). Figure 2 is based on stratigraphic and geological data from Mégard (1979), and U–Pb detrital zircon data from Chew et al. (2008).

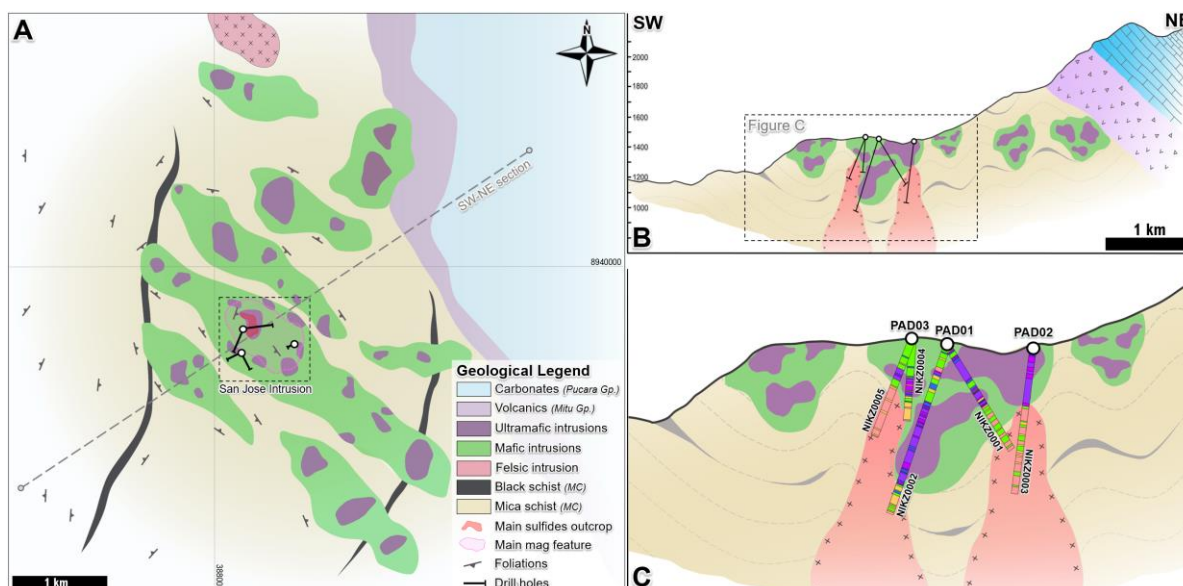


Fig. 3. Geology of the Nikolauz Project. (A) Geological map. (B) SW–NE geological section. The drill holes in the section correspond to those shown on the geological map. Undrilled mafic–ultramafic bodies in the NE portion are interpreted from map and geophysical projections. (C) Detailed portion of the geological section including drill hole profiles. Partially modified from Rio Tinto internal reports.

Geology of the Huánuco Region

Marañón Complex

[Cardona \(2006\)](#) distinguished two main units of the Marañón Complex in the Huánuco region: a gneissic unit, composed of biotite–muscovite gneiss and mylonitic granitoid east of the city, and a widespread schistose unit of quartz–mica schists with minor garnet (Fig. 1B). These units are represented in a simplified stratigraphic column together with younger volcanic and sedimentary covers (Fig. 2). Metamorphism in the region is low grade in the west (phyllites and schists, greenschist facies) and increases eastward to epidote–amphibolite facies (Fig. 1B). Both the gneissic and schistose units display concordant foliations. Four deformation phases were documented by [Mégard \(1978\)](#): an early Sn-1 fabric, the dominant Sn foliation, partial transposition during Sn+1 marked by thin mica–graphite bands, and regional folding related to Sn+2. [Cardona \(2006\)](#) interpreted Sn-1 and Sn as products of the same Famatinian deformational regime. Metamorphic studies further identified two main events: an Early Ordovician episode (~470 Ma, ~700 °C, ~12 kbar) associated with the Famatinian orogeny, and a Mid-Pennsylvanian event (~312 Ma, 4–10 kbar, 400–660 °C) linked to the Gondwanan orogeny ([Chew et al., 2005](#); [Cardona, 2006](#)). Geochronological data from [Cardona \(2006\)](#) indicate magmatic ages of 613 ± 35 Ma for the Huánuco gneisses, followed by metamorphism at 484 ± 12 Ma. Detrital zircon U–Pb analyses reveal two sedimentary episodes within the Marañón Complex: a Neoproterozoic “Older Marañón” and a Silurian–Devonian “Younger Marañón” ([Chew et al., 2008](#); Fig. 2).

Mafic-ultramafic Intrusions

Four clusters of mafic–ultramafic bodies in Huánuco, Huancapallac, Churubamba, Tantomayo, and Chinchao, were identified by [Granding & Zegarra \(1979\)](#). Huancapallac consists of NW-trending bodies up to 2 km long and several hundred meters wide, composed of sill-like dunite–peridotite–pyroxenite intrusions concordant with schists and locally mineralized with sulfides. Tantomayo hosts NW-trending intrusions, including sill-like bodies up to 200 m thick of dunite, peridotite, and pyroxenite, also concordant with schistose units. Churubamba includes smaller (<900 m) NW-trending serpentinized dunite. In Chinchao, [Guillon & Zegarra \(1977\)](#) described the NE-trending San Luis intrusion, a sulfide-bearing serpentinized dunite with gabbroic margins, and the San José (Nikolauz) intrusions. The latter are NW-trending sill-like bodies, up to 4 km long with steep SW dips, composed of variably altered ultramafic and gabbroic rocks that host magmatic Ni–Cu sulfides.

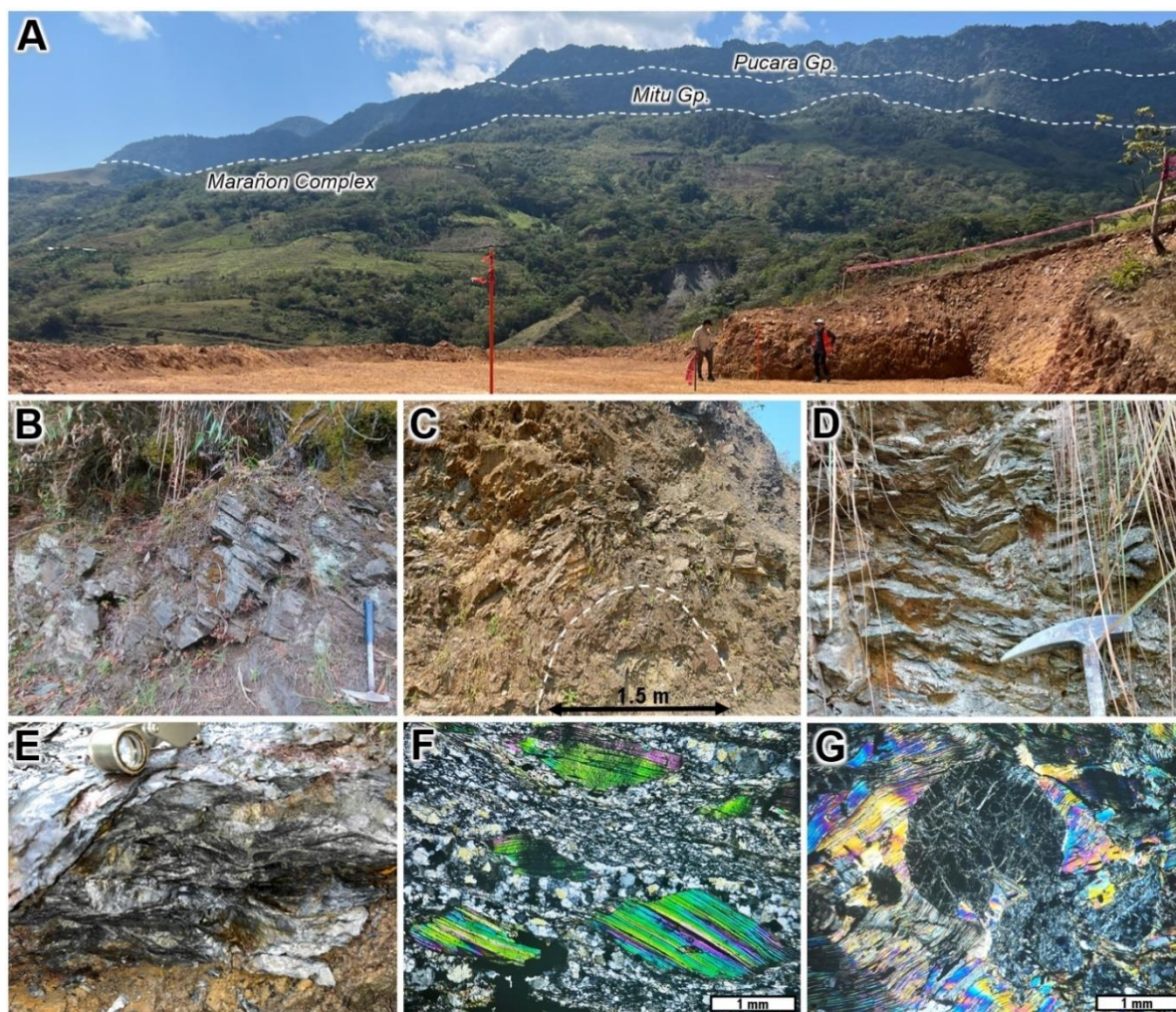


Fig. 4. (A) Panoramic view from drill hole PAD01 site, looking NE. The photo shows the upper part of the Younger Marañón Complex in discordant contact with overlying units of the Mitu and Pucará Groups in the background. (B–G) Photos and photomicrographs of schistose rocks from the Marañón Complex. (B) Outcrop of quartz–mica schist with prominent foliation dipping SW. (C–D) Variably folded quartz–mica schist. (E) Outcrop of dark gray graphite-bearing quartz–mica schist. (F) Photomicrograph of quartz–mica schist with mica fish and S–C microstructures. (G) Late-kinematic euhedral garnet porphyroblast in quartz–mica schist.

Mitu and Pucará Groups

The Marañón Complex is overlain by the Mitu and Pucará Groups (Fig. 2). The Mitu Group comprises continental conglomerates, sandstones, and shales interbedded with basaltic to andesitic alkaline lavas and minor peraluminous intrusions, dated at 245–220 Ma (McLaughlin, 1924; Spikings et al., 2016). Its base rests unconformably on Neoproterozoic–Paleozoic rocks, and the top grades concordantly into the limestones, dolomites, and black shales of the Pucará Group (Rosas et al., 2007).

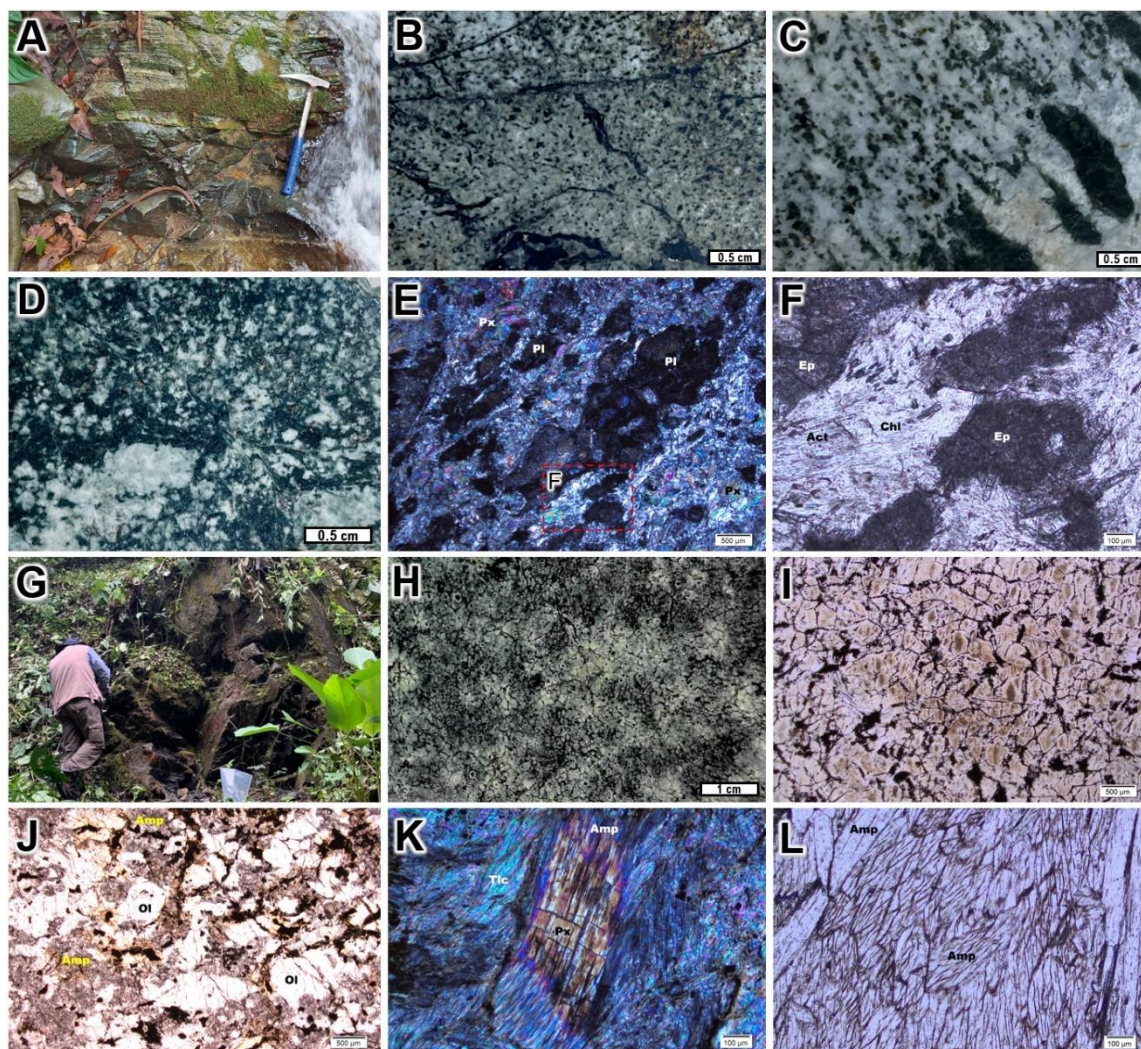


Fig. 5. Photos and photomicrographs of mafic-ultramafic rocks. (A) Outcrop of layered gabbroic rock. (B) Medium-grained gabbroic rock with tabular whitish plagioclase (Pl) and black anhedral pyroxene (Cpx) pseudomorphs. (C) Varitextured gabbroic rock consisting of elongated prismatic pyroxene and tabular Pl with distinct grain size. (D) Varitextured gabbroic rock with heterogeneous grain size and black anhedral Cpx pseudomorphs. (E–F) Photomicrographs of a gabbroic rock showing Pl and Cpx pseudomorphs; the dashed rectangle in (E) is detailed in (F). Pl is replaced by a fine-grained aggregate of abundant epidote (Ep), while Cpx is replaced by actinolite (Act) and chlorite (Chl). (G) Outcrop of massive dunite (serpentine). (H) Adcumulate dunite with olivine (Ol) pseudomorphs replaced by serpentine and minor opaque minerals. (I) Photomicrograph of accumulate dunite. Ol is replaced by serpentine (whitish bands) and magnetite (irregular black veinlets along fractures). Chromite (Chr) pseudomorphs occur as subhedral opaque crystals. (J) Photomicrograph of a peridotite (tremolite serpentinite) with Ol pseudomorphs within a fine-grained aggregate of tremolite (Amp), minor talc (Tlc), and Chl. Opaque minerals include magnetite and Chr. (K) Photomicrograph of a pyroxenite showing a Cpx relict within an aggregate of Amp and minor Tlc. (L) Photomicrograph of a pyroxenite (tremolite), consisting of fine- to medium-grained Amp.

Methods

The geological map and section presented in this study were developed using exploration data from Rio Tinto's Nikolauz Project, which includes geology observation points, soil geochemistry and geophysical surveys. The geological section was interpreted combining geological maps and 5 drill core logs. Petrographic study of 34 thin-polished sections of representative rocks and sulfide mineralization was carried out at the Microscopy Laboratory of the University of Brasília, Brazil. A total of 454 geochemical analyses of whole rock drill core samples acquired for the exploration program were used in this study. Drill core samples weigh an average of 2 kg and were collected continuously at intervals of 2 to 3 meters, depending on lithological or mineralization contacts. Outcrop samples include 99 mafic-ultramafic rocks collected throughout the Nikolauz MUM intrusions. Analyses were carried out at ALS Global laboratories. Major oxides, trace elements, and rare earth elements were analyzed through lithium metaborate fusion followed by ICP-AES/MS detection. Elements such as Se, Te, and Bi were dissolved using aqua regia digestion and analyzed with ICP-MS. For Pd, Pt, and Au, fire assay fusion was employed, and analyses were conducted using ICP-AES.

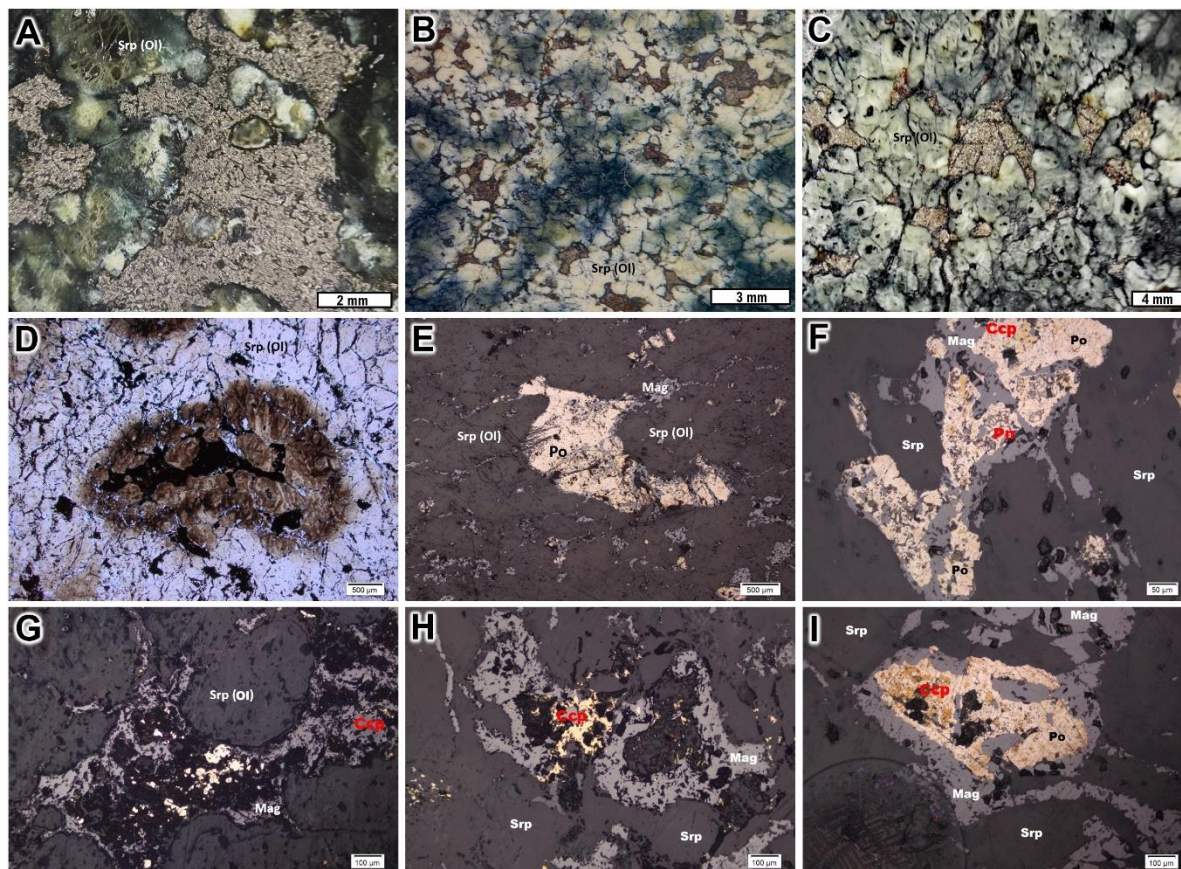


Fig. 6. Photos and photomicrographs of sulfide mineralization. (A) Net-textured sulfide mineralization in dunite. Olivine pseudomorphs are partially to completely enclosed by sulfides. (B–C) Sulfide blebs interstitial to olivine pseudomorphs. A whitish alteration halo occurs in olivine pseudomorphs adjacent to the sulfide blebs. (D) Photomicrograph showing a brownish alteration halo developed around sulfide blebs in the hosting dunite. (E–F) Photomicrographs of sulfide blebs, sulfides consist of pyrrhotite (Po) and minor pentlandite (Pn) and chalcopyrite (Ccp). Note partial alteration of sulfides to magnetite (Mag). (G–I) Photomicrographs of sulfide blebs variably altered to magnetite and Fe-hydroxides. Sulfides consist mainly of pyrrhotite (Po) with minor chalcopyrite (Ccp).

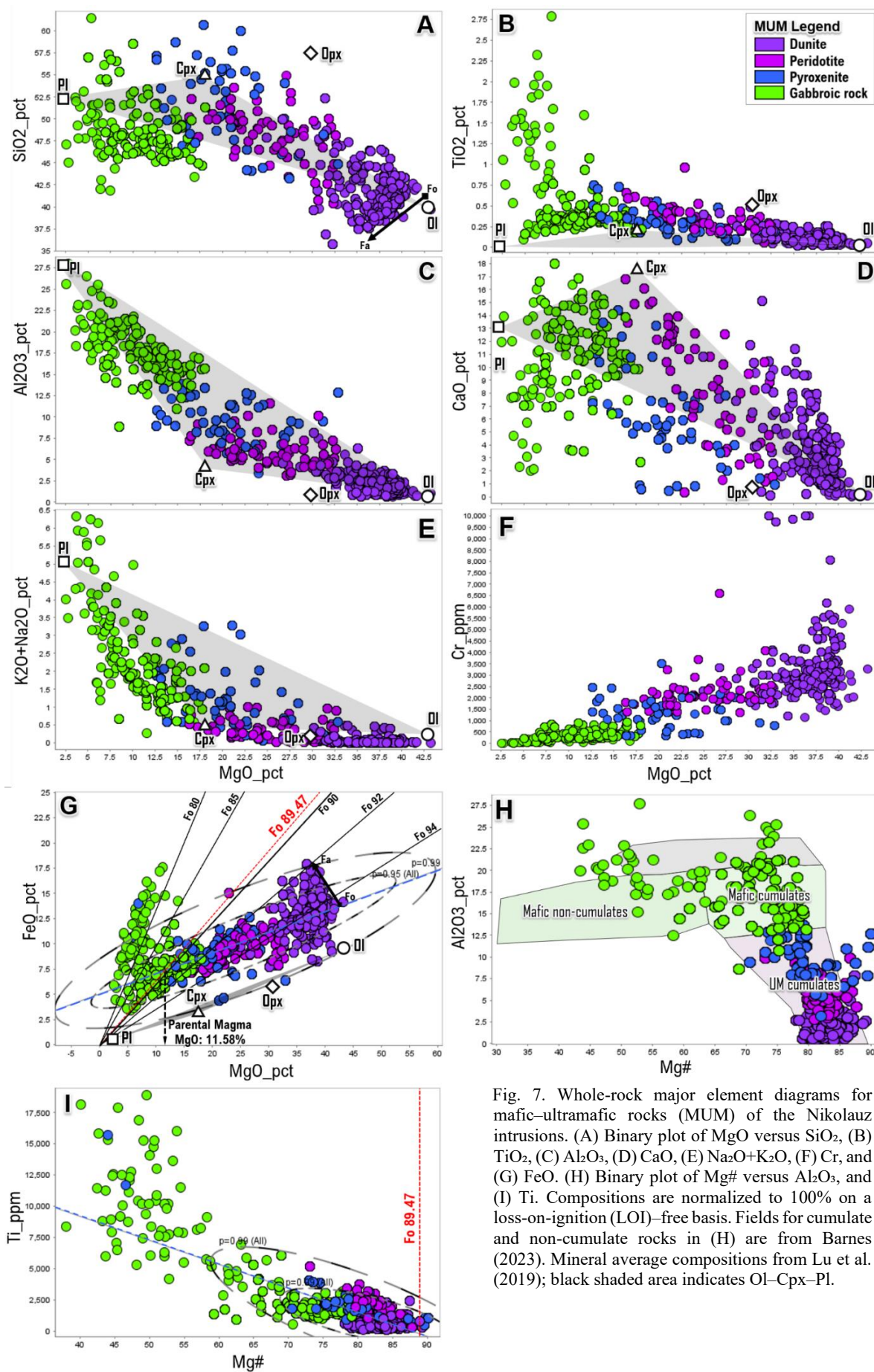


Fig. 7. Whole-rock major element diagrams for mafic-ultramafic rocks (MUM) of the Nikolauz intrusions. (A) Binary plot of MgO versus SiO_2 , (B) TiO_2 , (C) Al_2O_3 , (D) CaO , (E) Na_2O+K_2O , (F) Cr , and (G) FeO . (H) Binary plot of $Mg\#$ versus Al_2O_3 , and (I) Ti . Compositions are normalized to 100% on a loss-on-ignition (LOI)-free basis. Fields for cumulate and non-cumulate rocks in (H) are from Barnes (2023). Mineral average compositions from Lu et al. (2019); black shaded area indicates Ol-Cpx-Pl.

Geology of Nikolauz mafic-ultramafic intrusions

The mafic-ultramafic intrusions are predominantly hosted in quartz-mica schists of the Mara  n Complex, forming an array of elongated bodies broadly concordant with the main foliation of the country rocks (Fig. 3). The Mara  n Complex and mafic-ultramafic intrusions are overlain by discordant younger volcanic and immature sedimentary sequences of the Mitu group and carbonate-rocks of the Pucara group (Fig. 3 and 4A). Mafic-ultramafic intrusions are up to 4 km long and 1 km wide, consisting mainly of gabbroic rocks closely associated with irregular ultramafic domains. Granitoids of variable compositions crosscut the Mara  n Complex and mafic-ultramafic intrusions (Fig. 3). The following descriptions provide the main geological and petrographic features of country rocks, mafic-ultramafic bodies and younger granitoids.

Country rocks

Country rocks belong to the lower zone of the Younger Mara  n Complex (Fig. 2) and consist of quartz-mica schists and interlayered graphite-bearing lenses (Fig. 3). Quartz-mica schists are foliated rocks (Fig. 4B-C-D) consisting mainly of quartz (55-65%) and muscovite (20-30%), lesser amounts of chlorite (5-8%), biotite (2-3%), and plagioclase (2-3%), with tourmaline, rutile, zircon, and Fe-Ti oxides as common accessory minerals. Fine-grained schists with lepidoblastic texture predominate, but rocks with coarse-grained muscovite and/or garnet porphyroblasts within a fine-grained matrix also occur (Fig. 4F-G). Graphite-bearing rocks occur as distinctively darker quartz-mica schists (black schist) characterized by disseminated fine-grained graphite (Fig. 4E). The foliation in country rocks is commonly folded (Fig. 4C-D) and may have mica fish and S-C microstructures (Fig. 4F). Garnet occurs as late kinematic euhedral porphyroblasts crosscutting the foliation (Fig. 5G). The main foliation (Sn) of the schistose rocks predominantly follows the regional NNE trend of the area, but NW foliation predominates close to the mafic-ultramafic intrusions (Fig. 3A). The NW foliation of country rocks is concordant with the elongation of the mafic-ultramafic bodies, as well as fold axis described in outcrops close to the intrusion, suggesting that the emplacement of the intrusions disturbed the regional structures. Country rocks at the contact zone is characterized by a few meters thick intercept with progressive increase in mafic minerals toward the intrusion, suggesting partial assimilation and/or recrystallization of country rocks by the mafic-ultramafic intrusions.

The composition of the country rocks characterizes sedimentary protoliths consisting mainly of shales and minor black shales, consistent with the lower zones of the Younger Mara  n Complex (Fig. 2). Metamorphic paragenesis of the country rocks include chlorite-biotite-garnet-plagioclase-quartz-muscovite indicating metamorphism at the transition from the greenschist to the amphibolite facies.

Granitoids

Two distinct types of felsic intrusions were recognized during mapping nearby the Nikolauz MUM intrusions. One group of granitoids that crosscut the country rocks and mafic-ultramafic bodies have compositions ranging from granodiorite to monzogranite. These

granitoids occur in outcrops up to dozen meters in size and were also intercepted in drill holes (Fig. 3C). Phaneritic equigranular textures prevail but few meters thick pegmatitic veins with accessory tourmaline and biotite are common. A second type of granitoid with compositions ranging from syenogranite to alkali feldspar granite was mapped in the northmost portion of the mapped area (Fig. 3A). This granitoid commonly have porphyritic texture consisting of coarse-grained K-feldspar within a medium-grained quartz-plagioclase-biotite matrix, with accessory apatite, zircon and ilmenite.

Mafic-ultramafic intrusions

They are various kilometers-scale elongated bodies consisted of gabbroic rocks with several scattered domains (< 500 m long) of ultramafic rocks (Fig. 3). These intrusions occur predominantly as blocks and boulders with rare outcrops, but drill core descriptions provided additional constraints for their structures and compositions. Although the mafic-ultramafic intrusions commonly have primary magmatic textures preserved, the magmatic mineralogy is pervasively altered, consisting of pseudomorphs of olivine, pyroxene and plagioclase. Due to their pervasive alteration, igneous rocks are broadly classified based on their textures and relative amount of pseudomorphs into dunite, peridotite, pyroxenite and gabbroic rocks.

Gabbroic rocks are mainly massive with minor layered domains characterized by variable amounts of mafic and felsic minerals at centimetric to metric scale (Fig. 5A). Variably foliated domains with the main foliation predominantly concordant or sub-concordant to the layering are common. The gabbroic rocks consist mainly of medium-grained plagioclase and pyroxene pseudomorphs (Fig. 5B) with common vary-textured rocks indicated by irregular domains where coarse-grained pseudomorphs occur (Fig. 5C-D). Plagioclase pseudomorphs occur as fine-grained aggregates consisting mainly of clinozoisite, albite and white mica, while pyroxene pseudomorphs consist of fine- to medium-grained aggregates of actinolite, chlorite and epidote (Fig. 5E-F). Primary igneous minerals are rarely preserved just occurring as rare core domains in plagioclase crystals. Accessory minerals in gabbroic rocks include ilmenite, titanite, apatite, quartz and sulfides (mainly pyrite and chalcopyrite).

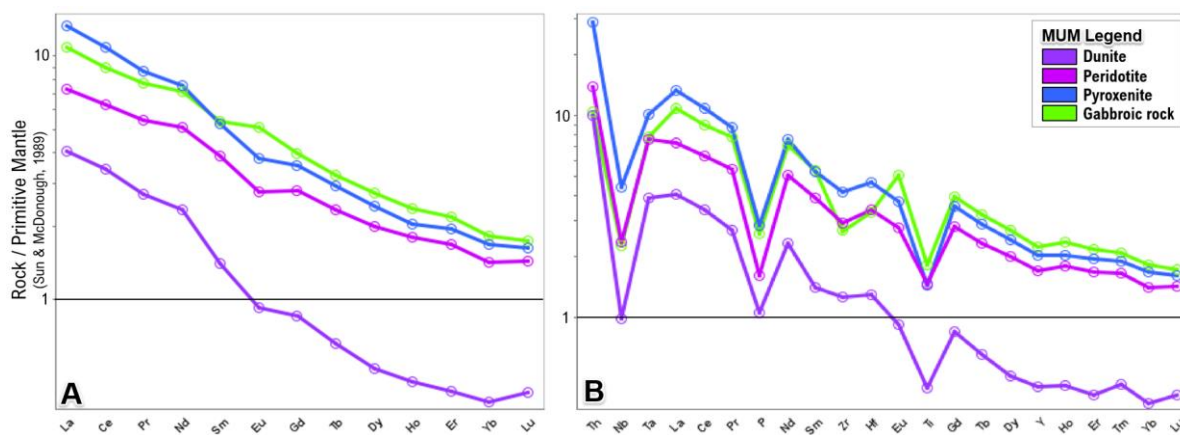


Fig. 8. (A) Primitive mantle-normalized rare earth element patterns and (B) alteration-resistant trace element patterns for average contents of mafic-ultramafic rocks of the Nikolauz intrusions. Primitive mantle normalization values are from Sun and McDonough (1989).

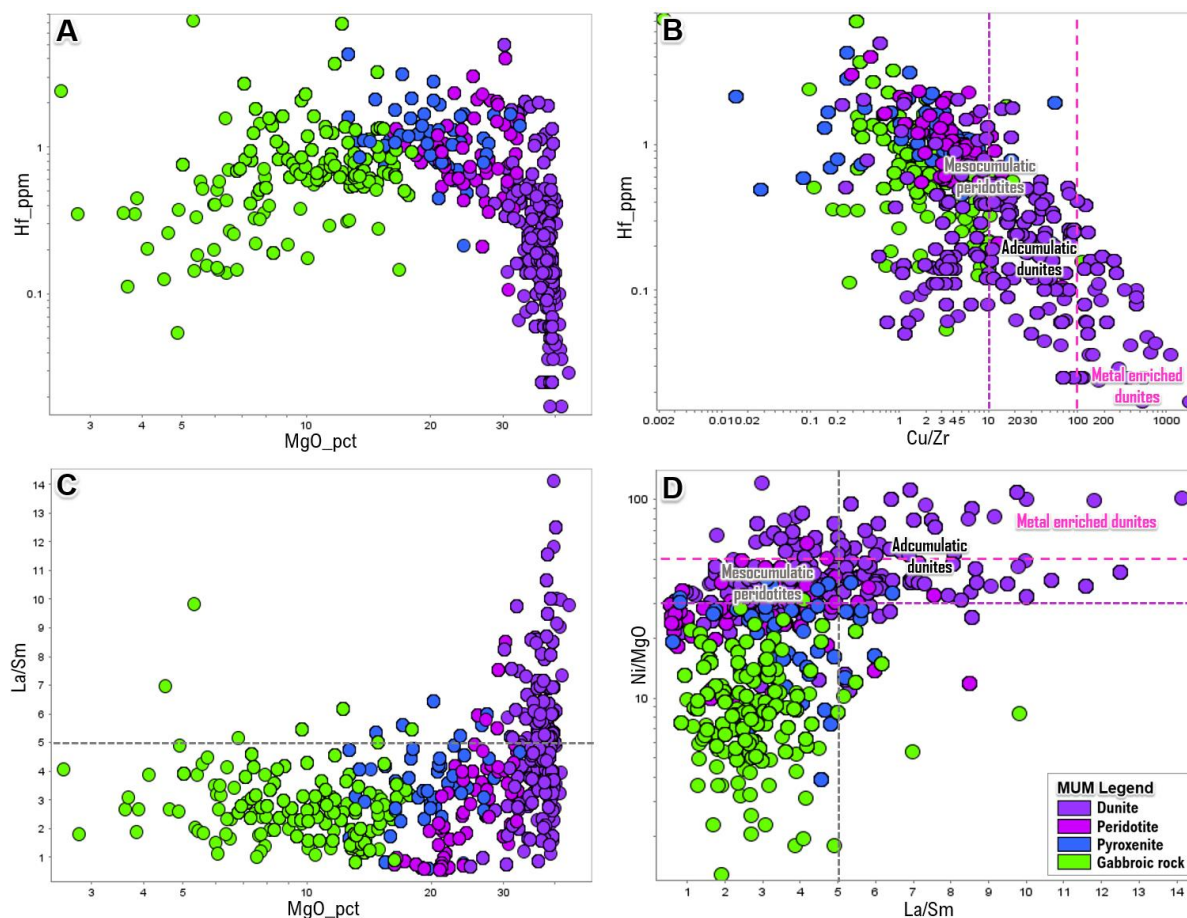


Fig. 9. Trace element diagrams for mafic-ultramafic rocks of the Nikolauz intrusions. (A) Logarithmic MgO scale versus Hf. (B) Cu/Zr (used as a chalcophile metal enrichment index) versus Hf. (C) Logarithmic MgO scale versus La/Sm. (D) Ni/MgO (used as a Ni saturation index) versus La/Sm.

Ultramafic rocks outcrop mainly as massive highly magnetic serpentinite resulting from pervasive alteration of adcumulate dunite (Fig. 5G), closely associated with minor tremolite serpentinite (after peridotite) and tremolite (after pyroxenite). The contact between the mafic with the ultramafic rocks are just seen in drill core, as is generally shown as thin transition zone (up to few meters thick) of peridotite, pyroxenite and/or melagabbroic rock in between the adcumulative dunite and the gabbroic rocks. The differentiation of the ultramafic bodies at the contact with gabbroic domains indicates that multiple ultramafic bodies crosscut the predominant gabbroic intrusions. Dunite has a medium-grained adcumulate texture consisting of olivine pseudomorphs replaced by serpentine and magnetite (Fig. 5H-I). Accessory minerals in dunite include fine-grained chromite pseudomorphs replaced by magnetite and ferrichromite, as well as variable amounts of carbonate, tremolite, chlorite, talc and sulfides. Carbonate and chlorite commonly occur as veinlets crosscutting the adcumulate texture. Sulfides with interstitial to matrix texture are common in dunite and will be described in the following topic. Peridotite consists of olivine pseudomorphs within a fine-grained aggregate of tremolite associated with variable amounts of talc, magnetite, carbonate and chlorite (Fig. 5J), suggesting an olivine cumulates with variable amounts of intercumulus pyroxene (meso-

to orthocumulate) and/or olivine+pyroxene cumulates. Peridotite also has accessory fine-grained chromite pseudomorphs extensively replaced by magnetite and ferrichromite. Pyroxenite consists of medium- to coarse-grained pyroxene pseudomorphs replaced by fine- to medium-grained aggregates of tremolite and minor talc (Fig. 5K-L). A few relics of partially preserved clinopyroxene occur in some samples (Fig. 5K).

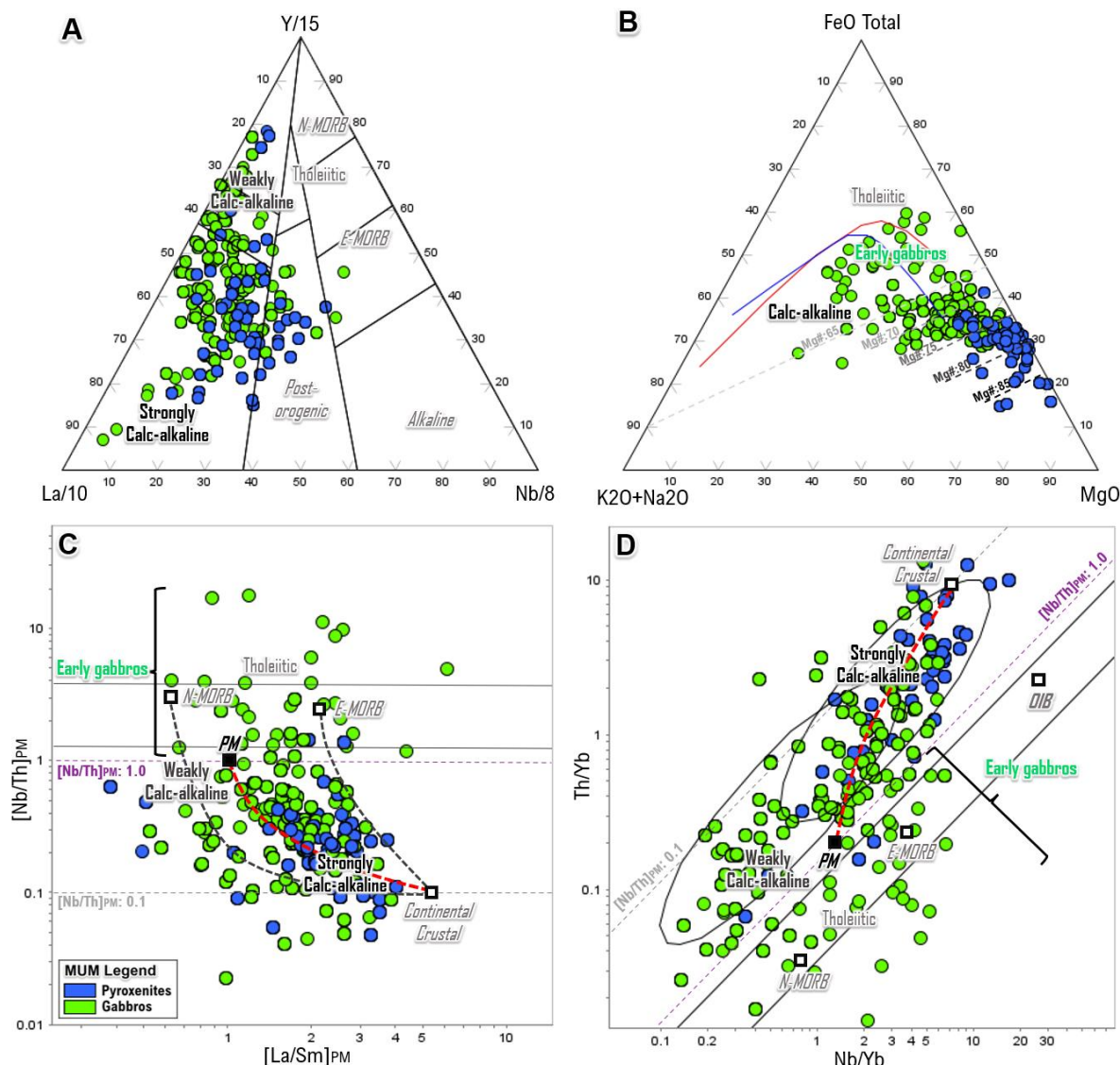


Fig. 10. Geochemical discrimination diagrams for mafic-ultramafic rocks of the Nikolauz intrusions. (A) Ternary diagram La–Y–Nb: most samples cluster near the La vertex, indicating La enrichment and strong depletion in Nb and Y, consistent with a calc-alkaline geochemical signature. (B) AFM diagram: based on MgO/FeO ratios, early gabbros plot within the weakly calc-alkaline field, whereas mafic-ultramafic cumulate units fall in the calc-alkaline domain. (C) Mantle-normalized Nb/Th and La/Sm ratios: mafic-ultramafic cumulates show a trend from Primitive Mantle (PM) toward continental crust averages, suggesting significant crustal contribution. (D) Th/Yb versus Nb/Yb relationships: mafic-ultramafic rocks fall within the range between Primitive Mantle (PM) and Upper Crust (UC), indicating metasomatized mantle sources influenced by crustal input.

Sulfide Mineralization

The drilling program carried out by Rio Tinto target geochemical and geophysical anomalies associated with occurrences of Ni-Cu sulfides in dunite. Several sulfide-mineralized zones, up to 40 meters thick, were intercepted within the ultramafic rocks, containing up to 0.35% Ni and 0.14% Cu, with other smaller localized centimeter-scale areas reaching 1.2% Ni and 1.0% Cu. Sulfide mineralization occur predominantly within dunite and includes disseminated, interstitial and net-textured sulfides, as well as minor domains with sulfide veinlets. Net-textured (Fig. 6A) and interstitial sulfide blebs (Fig. 6 B-C) predominate, consisting of sulfides enveloping or interstitial to olivine pseudomorphs. Although the primary magmatic minerals were pervasively altered, typical textures of magmatic sulfides (e.g., [Barnes et al., 2017, 2018](#)) are preserved, including sub-euhedral olivine with rounded faces and/or sulfide inclusions or corrosion gulfs (Fig. 6A). An alteration halo is commonly developed around sulfide blebs on the host dunite, which is possibly a result of alteration of sulfides during serpentinization of the host dunite (Fig. 6D). The sulfide assemblage consists mainly of pyrrhotite (> 90%) and minor amounts of associated pentlandite and chalcopyrite (Fig. 6E-F). Sulfides are variably altered to aggregates of magnetite and Fe-hydroxides (Fig. 6G-H-I), including pervasively altered sulfide blebs where magmatic sulfides were completely replaced by magnetite, Fe-hydroxides and secondary Ni-bearing minerals (e.g., violarite, heazlewoodite).

Whole-rock geochemistry

Major and minor elements: constraints for the parental magma composition

The concentrations of major elements in the Nikolauz mafic-ultramafic rocks are mainly controlled by the amount of olivine, pyroxene and plagioclase, as illustrated by their binary plots (Fig. 7). In these plots, major elements contents were normalized to 100% on a loss on ignitions (LOI)-free basis to reduce the effects of alteration, allowing their comparison with samples from unaltered intrusions. Major element compositions are consistent with our petrographic descriptions that characterized cumulate rocks consisting of variable amounts of extensively altered olivine, pyroxene and plagioclase (i.e., dunite, peridotite, pyroxenite, gabbroic rocks). Cumulate gabbroic rocks may be distinguished from mineralogically similar non-cumulate rocks (e.g., mafic dykes) by their higher Mg# (Fig. 7H). The abundance of samples with high MgO (> 35% and up to 43 wt.%) and Cr (> 2500 ppm and up to 1 wt.%) contents (Fig. 7F) indicates that dunite (olivine + chromite cumulate) is the predominant ultramafic rock in the Nikolauz intrusions. In addition, high CaO contents of ultramafic rocks (Fig. 7D) support petrographic evidence that Cpx is the predominant pyroxene (Fig. 5K-L). Highly variable contents of TiO₂ in gabbroic rocks, commonly < 0.25 wt.% but up to 2.75% (Fig. 7B), are consistent with the occurrence of accessory Fe-Ti oxides in the most fractionated plagioclase + pyroxene cumulates. Gabbroic rocks with higher TiO₂ contents have lower Mg# and plot mostly within the field of mafic non-cumulate rocks (Fig. 7H). The characterization of parental magmas of mafic-ultramafic intrusions provides clues for the nature of the mantle source and to processes that may lead to the origin of mineral deposits. The composition of parental magmas can be determined from chilled margin, related feeder dikes, or modeling based on combined whole-rock analyses and olivine compositions, as

illustrated in several studies (e.g., [Chai and Naldrett, 1992](#); [Barnes et al., 2010](#); [Li and Ripley, 2011](#)). Unfortunately, none of these approaches can be applied to the poorly exposed Nikolauz MUM intrusions. In addition, olivine compositions cannot be acquired due to the pervasive alteration of olivine crystals in dunite and peridotite of the Nikolauz intrusions (Fig. 5I-J). Nevertheless, the initial chemical conditions of the parental melt tend to closely resemble the geochemical composition of rocks with the highest Mg# values in mafic-ultramafic intrusions. The Fo content of the most primitive olivine was estimated by plotting whole rock contents of Ti versus Mg#, following the approach used by [Sproule et al. \(2007\)](#) in the Shakespeare intrusion. Extrapolating the Ti to Mg# linear correlation trend yielded an estimated Fo content of 89.5, interpreted to represent the composition of olivine crystallized from the parental magma before significant fractionation (Fig. 7I). The magma composition was estimated assuming that the most primitive ultramafic rocks of the Nikolauz intrusions formed by the solidification of a crystal mush consisting of olivine crystals and parental magma, such that the intersection of the trend line of the MgO versus FeO plot with the Mg# of a Fo 89.5 olivine corresponds to the composition of the parental magma (Fig. 7G). The implications of the estimated MgO and Fo contents obtained for the parental magma of the Nikolauz intrusion will be further considered in the discussion section of this study.

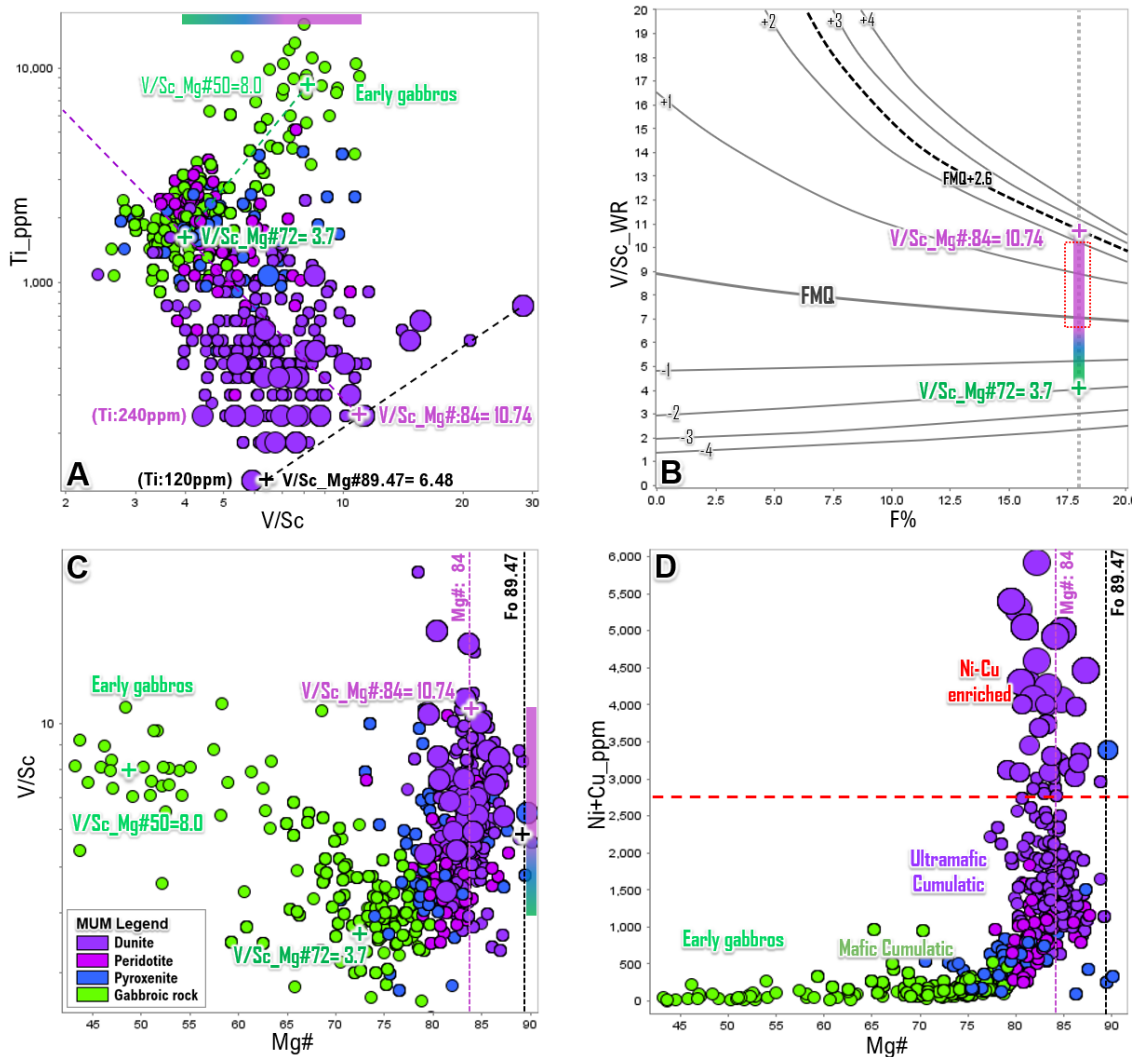


Fig. 11. (A) Ti versus V/Sc diagram. Minimum Ti and maximum Mg# (~89.5) reflect primitive magmas close to their mantle source. Under these conditions, V/Sc reaches ~6.48, representing primitive olivine. Along the mafic-ultramafic cumulate trend (Mg# 72–84), average V/Sc values were established at ~3.7 for gabbros and ~10.74 for dunites. (B) Whole-rock V/Sc versus F% (degree of partial melting), based on Cao et al. (2020). The FMQ value of the calculated primitive magma (FMQ+2.6), derived from the formula of Shishkina et al. (2018) using V/Sc_{Ol} and V/Sc_{dunite} (V/Sc of the parental magma; see formula 7 in the text), was interpolated with whole-rock V/Sc values according to the diagram of Cao et al. (2020). The intersection of the FMQ+2.6 curve with the V/Sc value (~10.74) of average dunites (Mg# 84) suggests a partial melting degree of ~18%. (C) V/Sc versus Mg# diagram. Dunites (Mg# 84) show an average V/Sc of ~10.74, decreasing to ~3.7 in differentiated cumulate gabbros (Mg# 72). Ti-rich gabbros (Mg# <65) exhibit an average V/Sc of ~8.0. (D) Ni+Cu versus Mg# diagram. Ni–Cu–enriched samples (>2800 ppm) are defined, with most of the mineralized samples clustering around Mg#: 84 ± 2.5.

Trace elements: tectonic and magmatic implications

The mafic-ultramafic rocks of the Nikolauz intrusion have low concentrations of incompatible trace elements (e.g., Hf, Nb, La, Yb), a typical feature of cumulate rocks. The combined effect of variable assemblages of cumulus minerals, fractionation of the parental magma, and variable amounts of trapped intercumulus liquid control the contents of incompatible trace elements in mafic-ultramafic cumulates (e.g., Barnes, 1986; Ferreira Filho et al., 1998; Godel et al., 2011). The mantle-normalized rare earth element (REE) and alteration-resistant trace element patterns of mafic-ultramafic whole-rocks from the Nikolauz intrusion are shown in Fig. 8. The trace element patterns for different mafic-ultramafic rocks of the Nikolauz intrusions are remarkably similar, a feature commonly used to suggest a cogenetic origin for magmatic rocks. The REE patterns are characterized by moderately negative slope for HREE and stronger slope for LREE, as indicated by [Gd/Yb]_{PM} and [La/Sm]_{PM} ratios ranging from 0.8 to 7.2 and 1.0 to 8.9, respectively. The mantle-normalized alteration-resistant trace element patterns for different cumulate rocks have prominent negative Nb-Ta, P and Ti anomalies. Apart from very similar patterns, the average contents of alteration-resistant trace elements in different cumulated rocks are distinctively different (Fig. 8). Distinct contents of immobile trace elements in different cumulate rocks are illustrated by the average concentration of Hf (Fig. 9A), which increases from dunite (~0.1 ppm) to peridotite (~0.7 ppm) and to pyroxenite (~1.2 ppm) and then decreases into the gabbroic rocks (~0.5 ppm). Variable but commonly very low Hf contents in dunite (Fig. 9A), as well as higher La/Sm ratios (Fig. 9C) is consistent with minor amounts of intercumulus liquid in olivine adcumulate rocks. On the other hand, different contents of incompatible elements for distinct rock types may derive from a combination effect of variable amounts of intercumulus liquid, distinct modal composition of minerals with different partition coefficient and progressive fractionation of the parental magma. Due to extremely low partition coefficient of Hf in plagioclase (Bédard, 2006), variable modal compositions possibly explain lower Hf contents in plagioclase-bearing cumulates (Fig. 9A). Minor positive Eu anomaly in gabbroic rocks (Fig. 8A), contrasting with minor negative Eu anomaly in ultramafic cumulates (dunite, peridotite, pyroxenite), is also possibly linked to the presence of plagioclase in gabbroic rocks.

The distribution of trace elements in igneous rocks serves as a key tool for constraining magma genesis in relation to its tectonic setting. Magmas generated in subduction zones typically exhibit strong Nb and Ta depletion, which is commonly attributed to the retention of these elements in rutile-bearing residues during slab dehydration (Gao et al., 2007) and to their specific mobility in slab-derived fluids under typical subduction conditions (Zheng,

2019). Enrichment in LREE relative to MREE-HREE further suggests advanced magmatic evolution, likely driven by interaction with continental crust. This interpretation is supported by the contrasting geochemical behavior of these elements, as their concentrations in the residual melt are controlled by their incompatibility (e.g., La) or compatibility (e.g., Y, Yb) with amphibole and garnet. Thorium is a highly incompatible element that becomes progressively enriched during fractional crystallization and is typically concentrated in evolved melts or assimilated from mature continental crust (Pearce & Reagan, 2019; Pearce, 2008).

To analyze the rocks of the Nikolauz mafic–ultramafic intrusion, the influence of crystal accumulation on geochemical ratios was removed; thus, adcumulate and mesocumulate dunite and peridotite were excluded from the dataset. Although the FeO/MgO ratio increases with magmatic differentiation, total FeO content decreases as K₂O+Na₂O becomes enriched. The data also forms a well-defined cluster within the calc-alkaline field in the AFM ternary diagram (Fig. 10B). In the Y–Nb–La ternary diagram (Fig. 10A), these rocks cluster toward La–Y enrichment and are displaced from the Nb-rich corner, indicating pronounced Nb depletion consistent with a typical subduction-related magmatic affinity. Additionally, [Nb/Th]PM ratios range from ~0.05 to 10, although most values lie between 0.1 and 1, suggesting a mantle-derived source with notable crustal input (Fig. 10C).

Barnes et al., (2023) noted in the Nb/Yb vs. Th/Yb diagram that mineralized LIP intrusions follow a trend parallel to the contamination vector between Primitive Mantle (PM) and average Upper Crust (UC). In contrast, convergent margin intrusions such as Xiarihamu display similar trajectories but are characterized by lower Nb/Yb and Nb/Th ratios, potentially reflecting a metasomatized mantle source. The Nikolauz samples follow a comparable path between PM and average Continental Crust (CC) yet show relatively lower Nb/Yb and Nb/Th ratios, closely resembling the Xiarihamu trend (Fig. 10D).

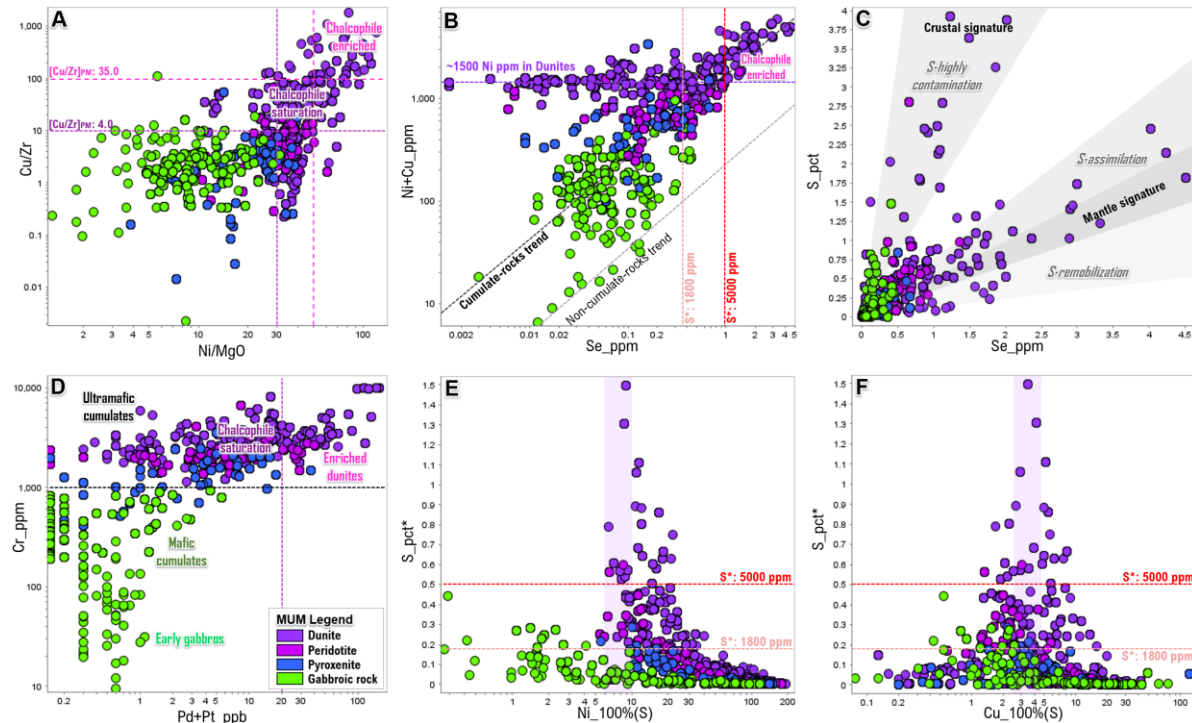


Fig. 12. A. Cu/Zr versus Ni/MgO diagram show a strong positive correlation between these ratios highlights that rocks with high Ni/MgO (>50) and Cu/Zr (>100) represent ultramafic adcumulates highly saturated in sulfides. B. Ni+Cu (ppm) vs. Se (ppm): A strong correlation between Ni-Cu and Se is observed, suggesting the geochemical distribution of these metals is controlled by sulfides. Se, with its chalcophile affinity and greater stability than S in metasomatized environments, remains concentrated in mineralized zones. C. The S (wt%) versus Se (ppm) diagram for the San José intrusion show two main trends: a high-slope trend (S/Se ~25,000) associated with higher crustal contamination and a lower-slope trend (S/Se 4350–6100) reflecting the Nikolauz magmatic signature, with an average S/Se of ~5065. D. The Cr versus. Pd+Pt diagram shows a strong positive correlation, where the highest Pd+Pt concentrations (~20–150 ppb) are linked to chromite-rich cumulated ultramafic rocks. E–F. The S (wt%) versus Ni100%(S) and Cu100%(S) plots illustrate synthetic estimates derived from Se-based S values. These provide qualitative trends in Ni and Cu distribution but should not be regarded as definitive tenors, as they may be overestimated.

The V/Sc ratio is a reliable proxy for magma oxidation, as V is redox-sensitive while Sc remains inert (Li and Lee, 2004). Experimental studies show that the partition coefficient of V in olivine (D_{Ol}^V) decreases with increasing fO_2 in magmas, following the equation established for hydrated basaltic arcs (Shishkina et al., 2018):

$$\Delta FMQ_{Liq} = -3.07 \times \log D_{Ol}^V - 3.34 \dots (1)$$

Where D_{Ol}^V can be expressed as follows:

$$\begin{aligned} C_{Ol}^V / C_{Ol}^{Sc} &= D_{Ol}^V \times C_{Liq}^V / D_{Ol}^{Sc} \times C_{Liq}^{Sc} \\ C_{Ol}^{V/Sc} &= C_{Liq}^{V/Sc} \times (D_{Ol}^V / D_{Ol}^{Sc}) \\ D_{Ol}^V &= D_{Ol}^{Sc} \times (C_{Ol}^{V/Sc} / C_{Liq}^{V/Sc}) \dots (2) \end{aligned}$$

Where D_{Ol}^{Sc} is constant and equal to ~0.2 (Sun and Liang, 2013).

According to Cawthorn et al., (1991), cumulate rocks remain in equilibrium with interstitial magma within a restricted magmatic environment. In highly primitive cumulates, the concentration of element i in the parental magma (C_{Liq}^i) can be derived from its concentration in olivine (C_{Ol}^i) and in the cumulate rock (C_{WR}^i) using the following mass balance equation:

$$C_{WR}^i = C_{Liq}^i \times F_{Liq} + C_{Ol}^i \times F_{Ol} \dots (3)$$

Where F_{Liq} and F_{Ol} are the proportions of magmatic liquid and olivine, respectively.

For the V/Sc contents, the following equation applies:

$$C_{WR}^{V/Sc} = C_{Liq}^{V/Sc} \times F_{Liq} + C_{Ol}^{V/Sc} \times F_{Ol}$$

For primitive cumulate rocks from Nikolauz, $F_{Liq} = 0.05$ and $F_{Ol} = 0.95$ were considered. The V/Sc ratio in whole-rock cumulate dunite (Fo84) outside the pyroxenitic domain ($F_{Px} = 0$) is ~10.74. The most primitive olivine (Fo89.5) is associated with the lowest Ti values and correspond to a V/Sc ratio of ~5.9 (Fig. 11A). Substituting these values into Equation (3), the V/Sc content of parental magma is estimated at ~102.7. Using $C_{Liq}^{V/Sc}$: ~102.7 and $C_{Ol}^{V/Sc}$: ~5.9 in Equation (2) to evaluate Equation (1), the result is $\Delta FMQ_{Liq} = FMQ + 2.6$.

Although the V/Sc in whole-rock ratio is a good indicator of oxygen fugacity, the degree of partial mantle melting also influences it; at higher degrees of partial melting under oxidized conditions, the same V/Sc value would reflect higher oxygen fugacity values (Lee et al., 2005). For MORB-type magmas, partial melting is typically low (~10%; Lee et al., 2005), whereas komatiitic magmas exhibit higher degrees of melting, ranging from ~30% in Al-depleted variants to ~50% in Al-undepleted ones (Sossi et al., 2016). In subduction-related convergent environments, these degrees of partial melting may vary between 15–20% (Cao et al., 2020). From the relationships among V/Sc, FMQ, and partial melting (F%) established by Lee et al. (2005), where FMQ is shown as contour lines on a whole-rock V/Sc versus F% plot, the primitive ultramafic magmas of Nikolauz show an oxygen fugacity of FMQ + 2.6 and the V/Sc measured in primitive cumulate dunite is about ~10.74. By placing these values on Lee's diagram, the corresponding partial melting degree is about ~18%. (Fig. 11B-C).

Using Equation (3), with $F_{\text{Liq}}: 0.05$, $F_{\text{Ol}}: 0.95$, and considering a Ti content of 240 ppm in primitive cumulate dunite (Mg#: 84) along with the minimum Ti values (119.9 ppm) associated with the most primitive olivines (Mg#: 89.5) (Fig. 11A), the Ti concentration in the parental magma is estimated at 2518 ppm, equivalent to $\text{TiO}_2 = 0.42\%$.

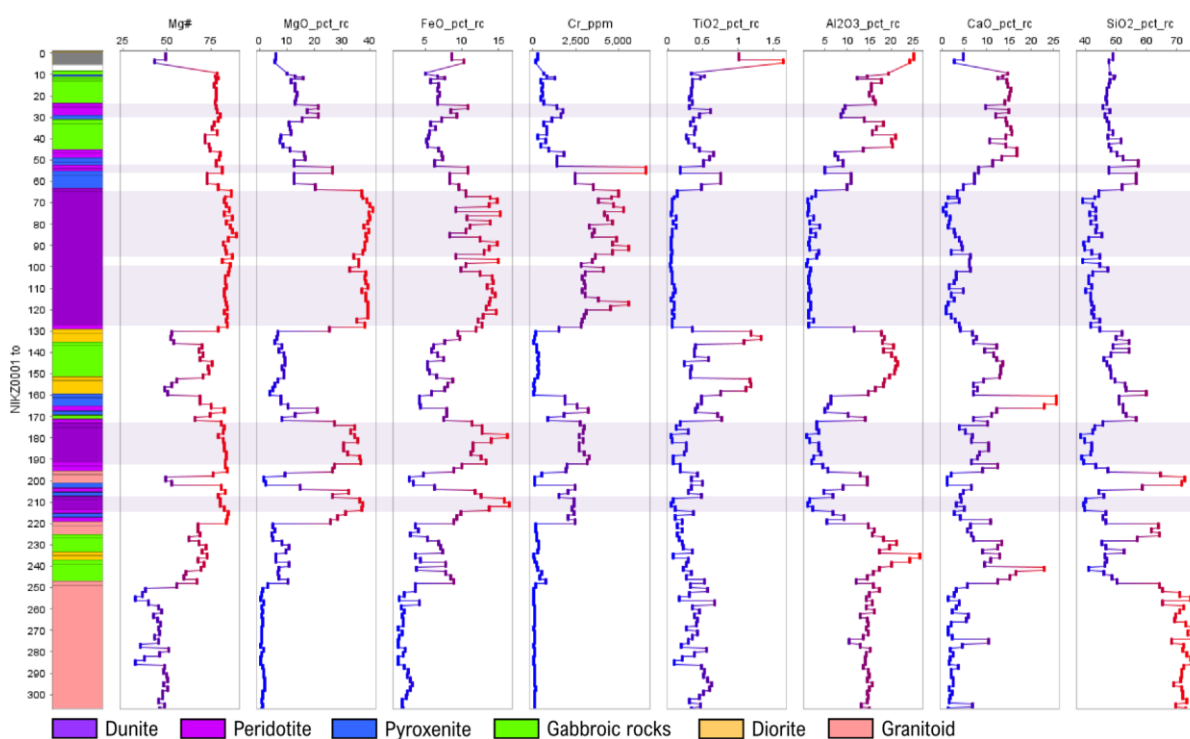


Fig. 13. NIKZ0001 drill hole strip logs and their Mg#, MgO, FeO, Cr, TiO₂, Al₂O₃, CaO and SiO₂ assay results (MUM rock-forming elements). Results from Rio Tinto geochemical database. Purple shading highlighting cumulate pulses.

Chalcophile elements: metal and sulfur distribution

Rocks with high sulfide enrichment ($\text{Cu}/\text{Zr} > 100$) have the lowest Hf concentrations (<0.2 ppm), consistent with their occurrence mainly in olivine adcumulate rocks. (Fig. 9B). Olivine-rich cumulates enriched in Ni-Cu also contain very low contents of incompatible trace

elements such as Nb (<0.5 ppm), La (<2.9 ppm), and Yb (<0.15 ppm). These lithologies, particularly ultramafic adcumulate rocks with high Ni saturation ($\text{Ni/MgO} > 30$; Fig. 9D), commonly exhibit elevated LREE/MREE ratios (e.g., $\text{La/Sm} > 5$).

Ni shows a positive correlation with MgO, with average concentrations of ~135 ppm in gabbroic rocks, ~470 ppm in pyroxenite, ~770 ppm in peridotite, and ~1500 ppm in dunite. Notably, among ultramafic rocks with 36–40% MgO (Mg#: 82–87), some Ni-enriched samples reach concentrations of ~2500 to 6000 ppm (Fig. 12B, Fig. 11D). Copper, in contrast, behaves as an incompatible element during the crystallization of cumulate silicate minerals in sulfide-undersaturated magmas, maintaining a nearly constant Cu/Zr ratio. Values lower than the primitive mantle reference ($[\text{Cu/Zr}]_{\text{MN}} \sim 5$) suggest sulfide liquid extraction, whereas higher values indicate accumulated sulfides (Barnes, 2023). Consistent with these observations, the Nikolauz intrusion also shows a progressive decrease in PGE content with increasing differentiation. In adcumulate dunite, where no chalcophile element enrichment is observed, Pd+Pt contents reach ~12.6 ppb (Pd: 5.45 ppb, Pt: 7.14 ppb). This trend continues through peridotite (~8.6 ppb Pd+Pt), pyroxenite (~4.5 ppb Pd+Pt), and gabbroic rocks, where Pd+Pt decreases to ~0.5 ppb. Ultramafic rocks enriched in platinum-group elements (PGE) are characterized by higher Cr contents and anomalous Pd+Pt values ranging from 20–150 ppb (Fig. 12D, Fig. 14). Samples with higher contents of Ni+Cu (3000–6000 ppm) and Pd+Pt (20–120 ppb) exhibit the highest values of $\text{Cu/Zr} > 100$ and $\text{Ni/MgO} > 50$. The strong correlation between these ratios, especially for $\text{Cu/Zr} > 10$ values, suggests a control of sulfide saturation, and supports their use as reliable indicators of chalcophile element enrichment (Fig. 12A).

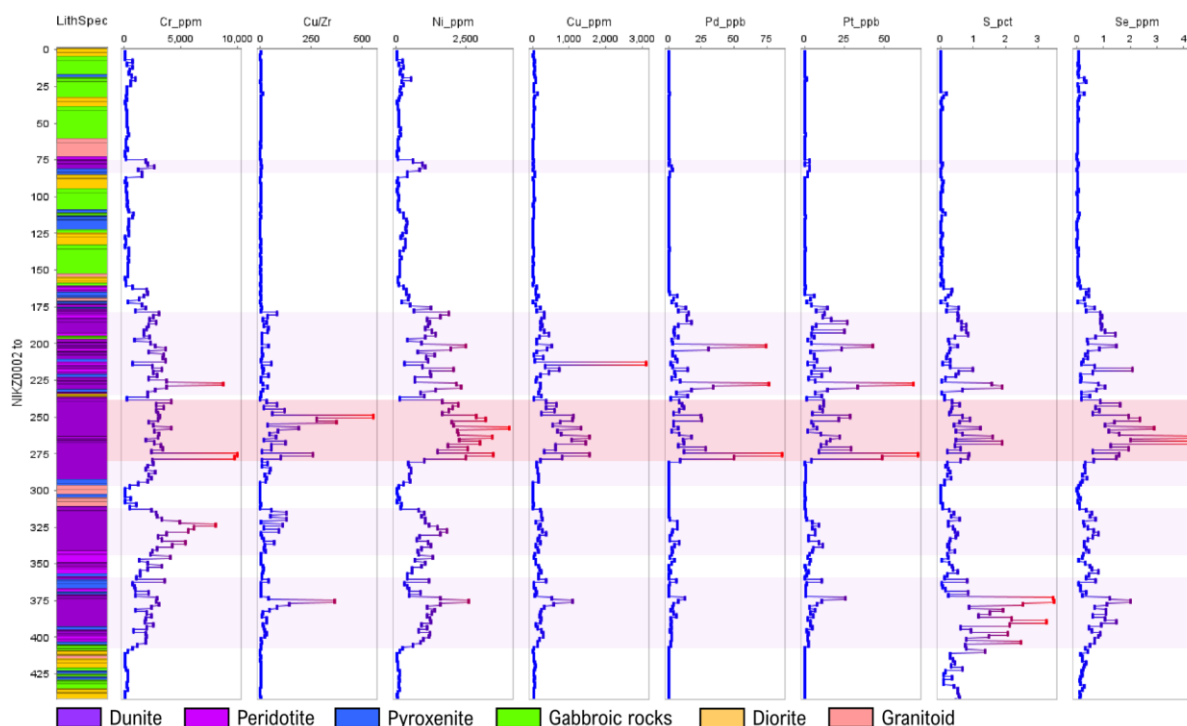


Fig. 14. NIKZ0002 drill hole strip logs and their Ni, Cu, Pd, Pt, S, Se assay results (chalcophile elements). Cr as a lithophile reference element, Cu/Zr ratio as a proxy for sulfide saturation and metal enrichment. Results from Rio Tinto geochemical database. Purple shading highlights cumulate pulses, red shading highlighting the zone of disseminated Ni-Cu sulfides.

Queffurus and Barnes (2015) showed that in metasomatized or hydrothermally altered environments, Se remains stable, while S is more mobile, often depleting and redistributing. Mantle S/Se ratios range from 2850 to 4350, with values exceeding this range signaling crustal contamination. In magmatic systems, the S/Se ratio can serve as a useful indicator of the relative mantle–crust contribution, providing context for interpreting sulfur behavior. In metasomatized rocks, it may be applied to approximate the original S content, although such estimates should be treated as a reference rather than a definitive value.

For the Nikolauz intrusion, selenium (Se) shows a consistent correlation with Ni–Cu metals (Fig. 12B), indicating that even in altered samples, Ni–Cu magmatic mineralization has not been significantly remobilized by post-magmatic processes. This interpretation is further supported by drillhole evidence, where S is variably remobilized during metasomatic overprinting, while Se remains consistently correlated with Ni–Cu sulfides. Comparison of sulfur (S) with Se reveals two trends: one indicative of stronger crustal influence and another reflecting a mixed mantle–crust signature ($S/Se \approx 5065$), although most samples cluster at low S and Se values (Fig. 12C). Using the synthetic S value derived from Se to calculate Ni and Cu tenors via the formula of Barnes and Lightfoot (2005) introduces a degree of uncertainty; while the geochemical trends are improved, the calculated tenors may remain overestimated. In any case, this underscores the need to interpret such tenors with caution and to regard the S/Se ratio primarily as a qualitative indicator of crustal interaction.

The tenors for Ni, Cu, Pd, and Pt were calculated using the formula by Barnes and Lightfoot (2005):

$$C_{100\%sul}^{Metal} = C_{WR}^{Metal} \times 100 / (C_{WR}^{S^*} \times 2.527 + C_{WR}^{Cu} \times 0.3408 + C_{WR}^{Ni} \times 0.4715) \dots (4)$$

Where $C_{WR}^{S^*}$, C_{WR}^{Cu} , C_{WR}^{Ni} are whole rock concentrations of S estimated, Cu, and Ni in percentage, resulting in: $C_{100\%sul}^{Ni}$: ~ 5 - 10% (Fig. 12E), $C_{100\%sul}^{Cu}$: ~ 1.5 - 4% (Fig. 12F).

Mafic-ultramafic zoning

Drillholes NIKZ0001 and NIKZ0002 provide a detailed view of the geometry and internal composition of the Nikolauz intrusion. Whole-rock data reveal distinct variation patterns, reflecting the composition of variable amounts of cumulus minerals (olivine, clinopyroxene, plagioclase, chromite) and sulfide liquid components (Ni, Cu, Pd, Pt, S, Se). In drillhole NIKZ0001 (Fig. 13), MgO follows a monotonic linear trend (~38%) throughout the medium-grained dunite zone (adcumulate), with FeO and Cr consistently above 12% and 2000 ppm, respectively, indicating olivine-chromite-pyroxene cumulates. Towards the margins, MgO, Cr, and FeO decrease, marking differentiated phases enriched in Al_2O_3 , TiO_2 , and CaO, corresponding to fine-grained peridotite (mesocumulate). Medium to coarse-grained pyroxenite zones (meso to orthocumulate) show Cr values generally below ~2000 ppm, indicating Cr hosted in pyroxene or minor chromite. Pyroxenite with Cr below ~1000 ppm suggests an absence of chromite. Some peridotite-pyroxenite intervals (e.g., 160–170 m) exhibit $CaO > 10\%$, suggesting clinopyroxene cumulates. The more differentiated mafic-ultramafic margins contain medium- to coarse-grained gabbroic rocks (orthocumulate, vari-textured) with relative lower MgO (~10%), FeO (~6.5%), and Cr (~350 ppm) contents. These

ultramafic boundaries abruptly truncate the geochemical profile, indicating that the magmatic pulse that formed the ultramafic cumulates crosscut a pre-existing gabbroic domain. At depths greater than 250 meters, granitic intrusions with $\sim 70\%$ SiO_2 were intercepted. Drillhole NIKZ0002 (Fig. 14) shows a strong Ni-Cu-Pd-Pt-S-Se covariance, reflecting the presence of disseminated Ni-Cu sulfides in dunite. Ni strongly correlates with Cu, particularly between 250–290 meters, where Ni reaches 0.3–0.4% and Cu 0.12–0.15%. Pd and Pt also exhibit a strong mutual correlation, peaking at ~ 14 ppb Pd and ~ 12 ppb Pt in sulfide-rich zones, with erratic spikes reaching ~ 86 ppb Pd and ~ 71 ppb Pt. The S-Se covariance ranges from moderate to high, though metasomatic overprinting has remobilized and depleted S in several sectors, whereas Se remains strongly correlated with Ni-Cu.

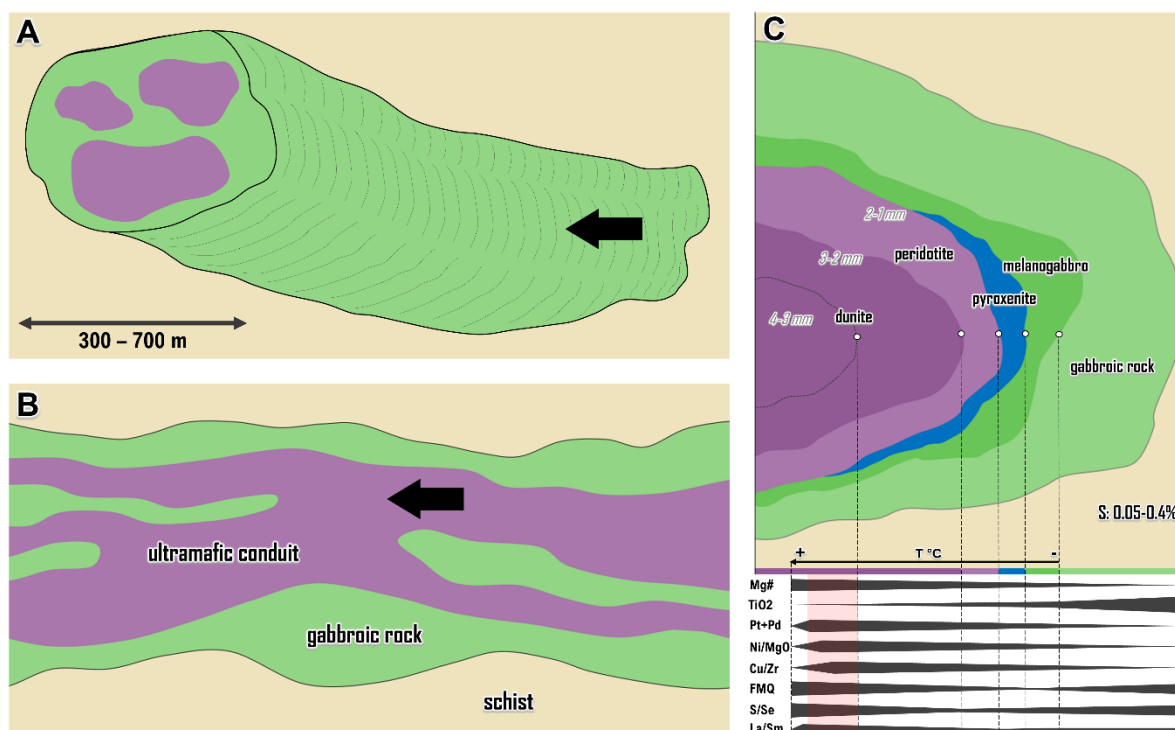


Fig. 15. Schematic representation of the San Jose dynamic magmatic conduit. A) Tubular chonolith consisting of a gabbroic body crosscut by cumulate pulses. B) Longitudinal view of the San Jose dynamic conduit, illustrating the lateral flow of ultramafic material. C) Schematic compositional zoning of an ultramafic cumulate pulse, highlighting variations toward the margins associated with magmatic differentiation and progressive cooling. Key geochemical indicators are also depicted.

Discussion

A dynamic conduit system within an orogenic setting

Dynamic conduit magmatic systems, characterized by high-temperature mafic-ultramafic magmas, facilitate sulfide segregation by incorporating crustal sulfur, creating optimal conditions for Ni-Cu deposit formation (Naldrett, 1998, 2011; Naldrett and Lightfoot, 1999; Barnes and Maier, 1999; Barnes et al., 2016). Dynamic systems refers to open magmatic systems, where crystals flow through conduits with recurrent recharge pulses, accumulating

with limited compositional ranges and maintaining a stable balance between crystallization and recharge (Glazner et al., 2004; Coleman et al., 2004; Ariskin et al., 2018). In contrast, closed systems form in a single event of magma emplacement, evolving solely through *in situ* fractional crystallization, which makes them less favorable for Ni-Cu sulfide accumulation (Wager and Brown, 1968; Namur et al., 2015; Latypov et al., 2020). Rocks from open systems tend to be more compositionally homogeneous and dominated by olivine-chromite-pyroxene cumulates, due to the constant magmatic recharges and magma dynamics, promote sulfide accumulation through mechanical transport in intercumulus zones, making these cumulates key vectors for magmatic deposit exploration (Cameron, 1978; Robertson et al., 2015; Barnes, 2023). Although dynamic magmatic systems with economic potential are typically linked to Large Igneous Provinces (LIPs), the Xiarihamu deposit (157Mt @ 0.65% Ni) demonstrates that certain orogenic environments can also form large Ni-Cu deposits (Li et al., 2015; Song et al., 2016; Song et al., 2020; He et al., 2022). In this context, the ultramafic units from Peru, traditionally considered ophiolitic fragments (Misión Española, 1983; Castroviejo et al., 2009; Rodríguez et al., 2010; Tassinari et al., 2011), do not initially stand out as having potential for developing Ni-Cu magmatic sulfide deposits. However, recent studies of the Nikolauz mafic-ultramafic intrusion in Chinchao-Huanuco have identified and characterized a dynamic conduit magmatic system in the Andes, hosted in the metasedimentary sequences of Marañón Complex.

The magmatic structure of Nikolauz has been interpreted from field mapping, petrography, geochemistry, and drill core data. This mafic-ultramafic intrusion comprises multiple pulses of hot primitive magma that has formed ultramafic rocks crosscutting tubular-shape intrusion made of gabbros. These ultramafic rocks differentiate outward concentrically, transitioning from a adcumulative dunite core, to a narrow peridotite-pyroxenite transition zone and finally gabbros in the external margin. The central ultramafic units contain coarser-grained (~0.4-0.3 mm) olivine-chromite cumulates, grading outward into olivine-orthopyroxene and pyroxene cumulates, with finer (~0.1 mm) pyroxene-plagioclase cumulates at the margins (Fig. 15). These patterns reflect higher flow and temperature in the channeled facies, promoting olivine accumulation at the conduit core, while decreasing flow and temperature at the margins favor more evolved cumulates. The intrusion follows a tubular chonolith geometry, akin to Nebo-Babel and Limoeiro (Barnes et al., 2016; Mota-e-Silva et al., 2013), transitioning from broad dunitic cores to progressively narrow differentiated margins.

Each ultramafic pulse exhibits similar differentiation trends; however, only some display geochemical fertility features (e.g., Cu/Zr >100, Ni/MgO >50), which is closely associated with sulfide-enriched dunite units. These zones mainly consist of medium-grained adcumulus dunite, where Ni-Cu mineralization occurs as intercumulus disseminations, blebs, or net-textured sulfides, including pyrrhotite, pentlandite, and chalcopyrite. These features indicate sulfide segregation by immiscible sulfide liquids within mafic-ultramafic magmas (Naldrett, 2004). After segregation, the immiscible liquids circulate within intercumulus spaces, concentrating in structural traps where magmatic flow is disrupted. All these characteristics distinguish the Nikolauz intrusion from a closed magmatic system or an ophiolitic fragment. Instead, it clearly corresponds to a dynamic conduit magmatic system hosted in the Eastern Cordillera of the Peruvian Andes.

Magmatic environment and parental magma

Nikolauz mafic-ultramafic intrusion characterized by cumulate pulses, feature mafic-ultramafic rocks with Mg# values between 65 and 90. The calculated compositions for this parental magma show MgO values of 11.58% and TiO₂ of 0.42%. According to the MgO-TiO₂ relationships developed by [Pearce and Reagan \(2019\)](#), these compositions are consistent with a boninitic composition. The calculated composition of the most primitive olivine in equilibrium with this parental magma has a forsterite content of 89.5 mol%, comparable to mantle olivine compositions according to [Zhang et al., \(2017\)](#). The mafic-ultramafic rocks of this intrusion are enriched in LREE (e.g., La) and depleted in Nb and Ti, additionally, the [La/Sm]_{PM}, Nb/Yb, and Th/Yb ratios increase from primitive compositions, while [Nb/Th]_{PM} decreases, reaching a signature resembling that of the upper crust. Although similar patterns can be observed in mantle magmas from other origins affected by crustal contamination, the presence of a boninitic parental magma with calc-alkaline characteristics suggests that these magmas formed in a subduction-related setting with high temperatures of mantle melts that strongly assimilated crustal material during ascent. Furthermore, the V/Sc calculation in both the whole rock and initial melt, following [Cawthorn et al., \(1991\)](#), and applying the $\Delta FMQLiq$ equation from [Shishkina et al., \(2018\)](#), allowed us to estimate an oxygen fugacity for the parental magma of FMQ+2.6. This oxidation state, in turn enabled an estimate of the partial melting degree (F%) by extrapolating relationships presented by [Lee et al., \(2005\)](#), yielding F values near ~18.0%. The ultramafic rocks exhibit platinum group element (PGE) contents like those of arc rocks (e.g., the Russian Magmatic Arc, [Kutyrev et al., 2021](#)), with whole-rock Pd and Pt concentrations notably lower than those typically reported for komatiitic or picritic magmas, consistent with expectations for magmas in this tectonic setting ([Barnes et al., 2015](#)).

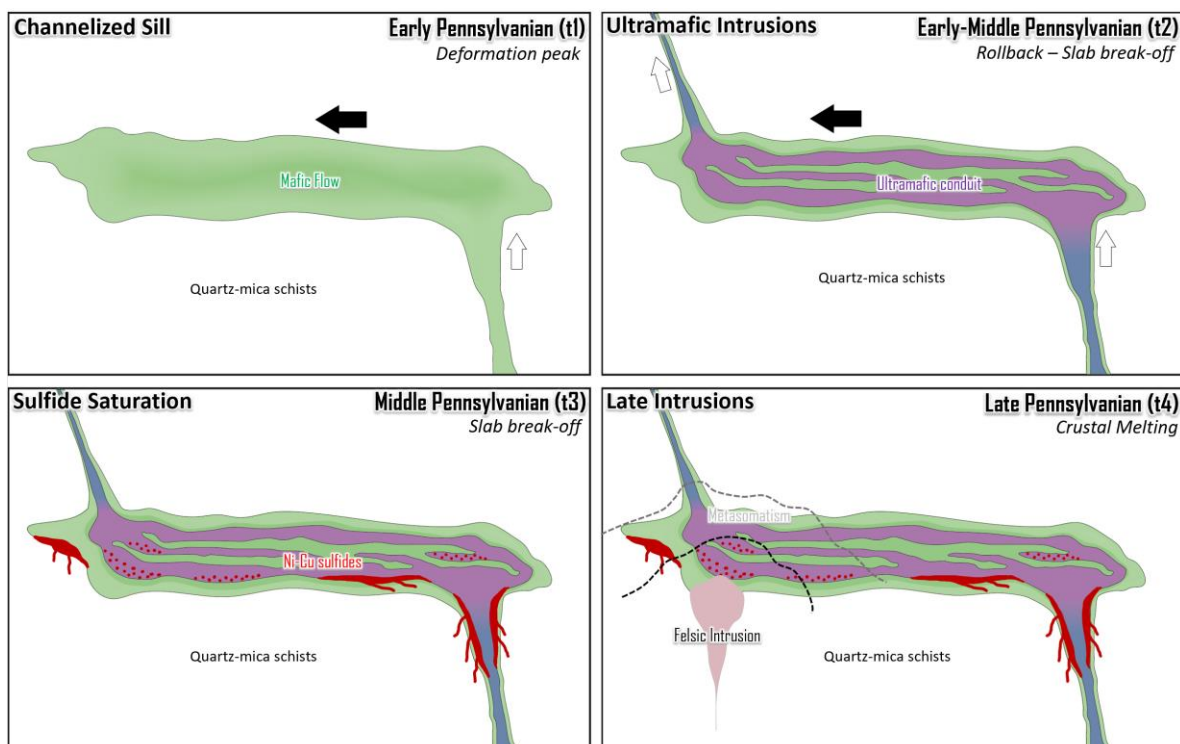


Fig. 16. Schematic longitudinal section illustrating the intrusive model for the ultramafic conduit hosting Ni-Cu sulfides in San Jose. The model evolves through distinct stages: an initial emplacement of channelized sill-type non-cumulate mafic magmas (t1); ascent of pyroxenitic-derived magmas (t2) leading to heat circulation and the flow of boninitic magmas, crystallizing within the dynamic channelized sill-type structure. As fractionation progressed, accompanied by cooling and magma reduction, conditions were reached for Ni-Cu sulfide saturation (t3), resulting in localized mineralization. Finally, crustal melting induced by the heat source generated late-stage felsic intrusions (t4), typical of bimodal magmatism under such conditions.

The ultramafic rocks of the Nikolauz intrusion are markedly enriched in Ni and Cu, with magmatic sulfides occurring as disseminations, blebs, and net-textured aggregates within olivine cumulates. This enrichment consists of a relatively high degree of partial melting ($F \sim 18\%$) and elevated oxidation conditions (FMQ+2.6), which together would have enhanced the assimilation of Ni and Cu from the mantle into the melt and maintained these metals in solution during magma ascent to the upper crust. This condition prevents sulfide formation at deep crustal levels, favoring sulfide saturation at shallower levels where dynamic magmatic systems develop (Cao et al., 2019, 2020). The mafic-ultramafic rocks of Nikolauz exhibit Mg# values ranging from 90 to 65, with a marked decrease in V/Sc values as Mg# decreases, suggesting magma reduction through differentiation processes. The critical range is Mg#: 84 ± 2.5 , where olivines show significant enrichment in Fe^{2+} , creating the most favorable conditions for sulfide saturation. It is precisely within this interval that the highest enrichment of Ni-Cu sulfide mineralization is observed. The zoning of the magmatic structure exhibits thick and relatively homogeneous olivine cumulate facies, accompanied by thinner and differentiated cumulate facies toward the margins. This cumulate stratigraphy reflects a heat flow pattern consistent with high-temperature magmas and a significant degree of mantle melting. In this context, boninitic magmas could have assimilated substantial crustal content due to the high temperatures of the partial mantle melting following rapid decompression after a compressional subduction event (after peak of Gondwanan deformation). The mantle melt under these conditions was likely pyroxenitic in nature, which would have favored the enrichment of Ni and Cu in the Nikolauz magmatic system.

Genesis of Ni-Cu sulfides in the Nikolauz intrusion

In Huánuco region, the main Sn deformation, linked to the Ordovician Famatinian orogeny, is recorded as regional NNE-trending foliations within the schist units of the Marañón Complex. In Chinchao locality, Sn+1 foliations with a dominant NW orientation and axial fold traces linked to Sn+2 have been attributed to the Gondwanan orogeny (Cardona, 2006). This orogeny, active during the Middle Devonian, was characterized by orthogonal subduction, with its compressive component progressively intensifying toward the Early Carboniferous (Miskovic et al., 2009). The early gabbroic intrusion, characterized by tubular chonolith bodies, exhibits foliations concordant with the enclosing schists and preferentially intrudes synclinal fold cores. These intrusions display foliations genetically linked to Sn+2 deformation, which likely peaked during maximum convergence rates of the Gondwanan orogeny, driven by low-angle oblique subduction and a transpressional regime. A subsequent metamorphic event in the Early-Middle Pennsylvanian (Chew et al., 2016; Cardona, 2006) coincides with a decrease in tectonic deformation, attributed to an increasing subduction angle that favored rollback processes. This shift reduced compressive forces, induced crustal

decompression, and facilitated mantle-derived material ascent, promoting mafic-ultramafic intrusions. These intrusions are genetically linked to a boninitic parental magma generated under ~18% partial melting conditions, highly oxidizing oxygen fugacities (FMQ+2.6), and a pyroxenitic mantle source. This setting suggests a slab break-off event during the Middle Pennsylvanian, facilitating the ascent of hot asthenospheric material and significantly increasing thermal conditions and mantle melting, similar to interpretations for the Xiarihamu deposit (Liu et al., 2018).

High oxidation conditions, likely enhanced by elevated H₂O content in the magma, may have promoted sulfide liquid accumulation and separation, optimizing Ni-Cu sulfide formation (Mota e Silva, 2011). Partial melting primarily affected pyroxenes, which melt at lower temperatures than olivine, leaving olivine in the residual solid phase. Consequently, mantle melts enriched in pyroxene-derived components were generated. The pyroxenitic source, inherently enriched in Ni and Cu, likely played a key role in triggering sulfide saturation, following a process analogous to that observed at Xiarihamu (He et al., 2022). This mantle melt ascended to the lower crust, assimilating crustal sulfur during its migration. Upon reaching its buoyancy limit, it flowed laterally along preexisting mafic structures, forming dynamic conduits. The cumulate pulses exhibit distinctive geometry and zoning, reflecting magmatic flow direction. In channelized facies, with higher flow velocities and temperatures, favor olivine accumulation, whereas marginal facies, with lower velocities and temperatures, lead to more fractionated cumulus assemblages. Ni-Cu mineralization in the Nikolauz intrusion was controlled by mechanical sulfide concentration within a channelized magmatic flow, where metal-rich liquid percolated through olivine cumulates and accumulated in specific ultramafic facies. The presence of Ni-Cu sulfides as net-textured, blebby, and intercumulus disseminations in dunite (~3.0 mm grain size, Mg#: 84 ± 2.5) indicates sulfide concentration under specific flow velocity and temperature conditions. In dynamic magmatic systems like this, massive sulfides may occur in discrete zones near feeders or structural traps, where sulfides physically separate from silicate magma. The intrusion of granitoids and pegmatites into the mafic-ultramafic units suggests that the high-temperature pyroxenitic melt induced crustal melting, generating felsic magmatism in later stages. These intrusions were likely determinant driving hydrothermal alteration, modifying some sulfides and imparting a distinctive geochemical signature (Fig. 16, Fig. 17). Similar granitoid intrusions and hydrothermal alteration zones have been documented in economic Ni-Cu deposits in orogenic settings, such as Xiarihamu (Han et al., 2020), reinforcing their significance in Ni-Cu magmatic systems associated with orogenic environments.

Exploration for orogenic Ni-Cu deposits in Peru

The evidence of a dynamic magmatic system with Ni-Cu sulfides in Nikolauz, along with other mineralized mafic-ultramafic intrusions in the Marañón metasedimentary rocks, underscores the Ni-Cu metallogenic potential not only in Huánuco but throughout the Eastern Cordillera. The Marañón Complex exhibits key characteristics to be considered a high-potential belt for hosting magmatic Ni-Cu sulfide intrusions. Structurally, the Nikolauz intrusion lies at the boundary between the Eastern Cordillera and the Sub-Andean zone (Andean orientation) within a deep system of orthogonal faults (trans-Andean orientation),

suggesting structural control by first- and second-order fault intersections. At a greenfield level, stream sediment geochemistry can effectively detect anomalies and Cr-Mg-Ni-PGE associations contrasting with the typical Si-Th-K-Zr signature of Mara  n complex rocks. Given that the Nikolauz mafic-ultramafic units are emplaced along axial folds of schist foliations, district-scale foliation mapping can help delineate favorable intrusion zones. Geological mapping, integrated with geochemical analysis, is essential for defining potential intrusion structures, identifying parts of intrusion with cumulus phases accumulation, and delineating Ni-Cu sulfide enrichment zones. This can be further refined using the lithogeochemical methodology of [Barnes \(2023\)](#) for Ni-Cu-Co deposits in magmatic intrusions. [Barnes and Lightfoot \(2005\)](#) highlight that magmatic Ni-Cu sulfide deposits in dynamic conduits are mainly associated with small mafic-ultramafic intrusions, where sulfide liquids are transported by magma precipitate in dynamic traps. This model enhances both genetic understanding and exploration strategies. However, the small size of massive Ni-Cu sulfide deposits presents exploration challenges, making high-resolution geophysical surveys essential. Magnetometry survey is particularly effective in detecting ultramafic bodies, as serpentinized dunitic intrusions exhibit strong magnetic contrasts against Mara  n rocks. Ground-based electromagnetic surveys are commonly used to detect massive sulfides and define drilling targets, especially in LIP terrains near craton margins with relatively flat topography. In contrast, rugged Andean terrains pose logistical challenges and potential signal distortions, making airborne electromagnetic surveys a viable alternative, although more limited in terms of depth of investigation. Another more frequently used option in the Andes is IP surveys, which are widely applied to detect both massive sulfides and disseminated metallic targets, while responses should be interpreted carefully in areas where fine-grained magnetite from serpentinization may contribute to the signal.

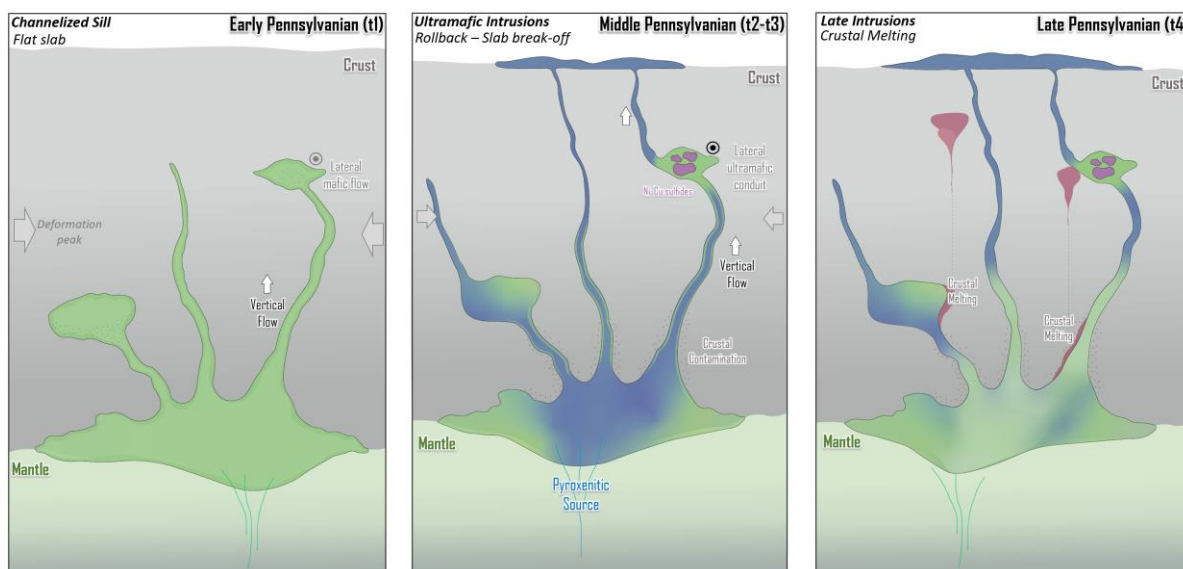


Fig. 17. Schematic tectono-magmatic model illustrating the formation of Ni-Cu sulfide mineralization in the dynamic magmatic system of San Jose. i. Early Pennsylvanian: Mafic magmas of peridotitic origin ascend vertically through the crust and are emplaced in a channelized sill system at upper levels. ii. Middle Pennsylvanian: A slab break-off event enables the ascent of magmas derived from a pyroxenitic mantle source, producing boninitic parental magmas. This process generates significant thermal input, establishing a dynamic system with ultramafic lateral flows within the channelized sill, facilitating the formation of Ni-Cu sulfides. iii. Late Pennsylvanian: Crustal melting induced by magmatic heat results in the intrusion of late-stage felsic magmas, characteristic of bimodal magmatism.

Conclusions

The main conclusions of this paper are as follows:

1. The Nikolauz mafic-ultramafic intrusion represents the first formally documented dynamic magmatic system with Ni-Cu sulfide mineralization in the orogenic Eastern Cordillera of the Peruvian Andes.
2. The Nikolauz mafic intrusions are located between the Andean-trending fault system marking the Eastern Cordillera boundary and an oblique NW-trending fault. They are discordant to the NNE Famatinian foliation, and at a local scale occur as tubular masses with NW foliations concordant to the enclosing schist rocks, preferentially intruding the cores of synclinal folds.
3. Primitive magmatic pulses of Nikolauz intrude the early foliated gabbros as channelized flows, dynamically moving through the magmatic conduit. This generates a broad olivine cumulus facies center in areas of higher flow velocity and temperature, with more fractionated facies toward the margins where flow velocity and temperature decrease.
4. Ni-Cu mineralization in the Nikolauz intrusion is controlled by mechanical sulfide concentration processes, where metal-rich liquid percolated through olivine cumulates and accumulated in specific ultramafic facies. Net-textured sulfides, blebs, and intercumulus disseminations related with medium-grained (~3.0 mm) primitive dunite rocks, indicate that this concentration occurred under the hottest and most dynamic phases of the magma flow.
5. The high oxygen fugacity calculated for the parental magma (FMQ+2.6) allowed sulfur to remain in solution as sulfate, preventing premature sulfide formation and promoting its accumulation at upper crustal levels. This created optimal conditions for the dynamic magmatic system to effectively concentrate Ni-Cu sulfides.
6. Sulfide saturation in the Nikolauz mafic-ultramafic intrusion was influenced by redox control and ultramafic magma fractionation processes that increased Fe^{2+} (reduced state) concentrations in olivines, favoring Ni-Cu sulfide formation in the critical ranges of Mg# ($\sim 84 \pm 2.5$).
7. The Nikolauz mafic-ultramafic intrusion shows compelling evidence of substantial crustal sulfur assimilation, reflected in elevated Nb/Yb–Th/Yb ratios and high S/Se values. Field observations reveal the presence of graphitic schist within the Marañón Complex, which likely acted as an additional sulfur source, complementing other crustal contributions that collectively played a critical role in triggering and enhancing Ni–Cu sulfide mineralization within the intrusion.
8. Mafic-ultramafic cumulate magmatism exhibits geochemical and petrographic hallmarks of arc settings, including a calc-alkaline affinity (MgO/FeOt: 0.5–0.8; La>Nb; Th/Yb: 0.1–10; [Nb/Th]_{PM}< 1), oxidizing conditions ($\sim \text{FMQ} + 2.6$), and high magmatic H_2O contents, reflecting subduction influence.

9. The parental magma of the Nikolauz mafic-ultramafic cumulate rocks exhibits boninitic compositions (MgO: 11.58%, TiO₂: 0.42%), is relatively depleted in platinum group elements (PGE), and originates from a pyroxenitic mantle source, which facilitated Ni-Cu enrichment in the magmatic system.
10. Ultramafic cumulate intrusions are interpreted to have possibly developed in a slab break-off context during the middle Pennsylvanian, shortly after peak Gondwanan compression (Sn+2).
11. The Ni-Cu magmatic sulfides hosted in the Nikolauz mafic-ultramafic intrusion, located in Chinchao, Huánuco, represent a dynamic magmatic conduit system in an orogenic environment, opening new opportunities for exploring these systems with potential to host magmatic Ni-Cu sulfides in the Andes of the Eastern Cordillera.

REFERENCES

- Ariskin, A., Danyushevsky, L., Nikolaev, G., Kislov, E., Fiorentini, M., McNeill, A., Kostitsyn, Y., Goemann, K., Feig, S.T. and Malyshev, A., 2018, The Dovyren Intrusive Complex (Southern Siberia, Russia): insights into dynamics of an open magma chamber with implications for parental magma origin, composition, and Cu-Ni-PGE fertility. *Lithos* v. 302-303, p. 242–262, doi.org/10.1016/j.lithos.2018.01.001.
- Barnes, S. J., 1986, The effect of trapped liquid crystallization on cumulus mineral compositions in layered intrusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 93, 524–531.
- Barnes, S. J., 2023, Lithogeochemistry in exploration for intrusion-hosted magmatic Ni–Cu–Co deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 2023, Article Geochem2022-025, v. 1, p. 23, doi.org/10.1144/geochem2022-025.
- Barnes, S.-J. and Maier, W.D., 1999, The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids. In: Keays, R.R., Lesher, C.M., Lightfoot, P.C., Farrow, C.E. G. (Eds.), *Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and their Application to Mineral Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes 13: p. 69–106.
- Barnes, S.-J. and Lightfoot, P.C., 2005, Formation of magmatic nickel sulfide deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents. In: Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P. (eds) *Economic Geology 100th Anniversary*, Society of Economic Geologists, Littleton, CO, v. 1905–2005, p. 179–213, doi.org/10.5382/AV100.08.
- Barnes, S.-J., Maier, W. D. & Curl, E. A., 2010, Composition of the marginal rocks and sills of the Rustenburg layered suite, Bushveld Complex, South Africa: implications for the formation of the platinum-group element deposits. *Economic Geology* 105, 1491–1511.
- Barnes, S. J., Mungall, J. E. and Maier, W. D., 2015, Platinum group elements in mantle melts and mantle samples. *Lithos*, v. 232, p. 395–417, doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.007.
- Barnes, S. J., Cruden, A. R., Arndt, N. and Saumur, B. M., 2016, The mineral system approach applied to magmatic Ni–Cu–PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 76, p. 296–316, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.012.
- Barnes, S.J., Mungall, J.E., Le Vaillant, M., Godel, B., Lesher, C. M., Holwell, D., Lightfoot, P.C., Krivolutsкая, N. and Wei, B., 2017, Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: disseminated and net-textured ores. *American Mineralogist*, v. 102, p. 473–506, doi.org/10.2138/am-2017-5754.

- Barnes, S. J., Staude, S., Le Vaillant, M., Piña, R. and Lightfoot, P. C., 2018, Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: Massive, semi-massive and sulfide-matrix breccia ores. *Ore Geology Reviews*, v. 101, p. 629-651, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.011.
- Bédard, J. H. (2006). Trace element partitioning in plagioclase feldspar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 70, no 15, p. 3717–3742, doi.org/10.1016/j.gca.2006.05.003.
- Cao, Y., Wang, C. Y. and Wei, B., 2019, Magma oxygen fugacity of Permian to Triassic Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in the central Asian orogenic belt, North China. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 173, p. 250-262, doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.01.024.
- Cao, Y., Wang, C. Y. and Wei, B., 2020, Magma oxygen fugacity of mafic-ultramafic intrusions in convergent margin settings: Insights for the role of magma oxidation states on magmatic Ni-Cu sulfide mineralization. *American Mineralogist*, v. 105, no. 12, p. 1841–1856, doi.org/10.2138/am-2020-7351.
- Cardona, A., Cordani, U.G., Ruiz, J., Valencia, V., Nutman, A.P. and Sanchez, A., 2006, U/Pb Detrital Zircon Geochronology and Nd Isotopes from Paleozoic Metasedimentary Rocks of Marañon Complex: Insights on the Proto-Andean Tectonic Evolution of the Eastern Peruvian Andes. In: Fifth South American Symposium on Isotope Geology, short papers, p. 208 – 211.
- Castroviejo, R., Pereira, E., Rodrigues, J. F., Acosta, J. and Espi, J. A., 2009, Pre-Andean serpentinite-chromite orebodies in the Eastern Cordillera of Central Peru, Tarma Province. *Proc. Tenth Bienn. SGA Meeting (Society for Geology Applied to Mineral Deposits)*, Townsville, Australia, p. 927-929.
- Cameron, E.N., 1978, The lower zone of the eastern Bushveld Complex in the Oliphants River Trough. *Journal of Petrology*, v. 19, p. 437–462, doi.org/10.1093/petrology/19.3.437.
- Cawthorn, R.G., Meyer, P.S. and Kruger, F.J., 1991, Major addition of magma at the Pyroxenite Marker in the Western Bushveld Complex, South Africa. *Journal of Petrology* v. 32, p. 739–763, doi.org/10.1093/petrology/32.4.739.
- Chai, G., & Naldrett, A. J., 1992, The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma. *Journal of Petrology*, 33(2), 277–303, doi.org/10.1093/petrology/33.2.277.
- Chew, D.M., Schaltegger, U., Miškovic, A., Fontignie, D. and Frank, M., 2005, Deciphering the tectonic evolution of the Peruvian segment of the Gondwanan margin. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), Extended Abstracts, p. 166–169, [fdi:010040198](https://doi.org/10.10040198).
- Chew, D.M., Magna, T., Kirkland, C.L., Miskovic, A., Cardona, A., Spikings, R. and Schaltegger, U., 2008, Detrital zircon fingerprint of the Proto-Andes: evidence for a Neoproterozoic active margin? *Precambrian Research* v. 167, p. 186–200, doi.org/10.1016/j.precamres.2008.08.002.
- Chew, D. M., Pedemonte, G. and Corbett, E., 2016, Proto-Andean evolution of the Eastern Cordillera of Peru. *Gondwana Research*, v. 35, p. 59-78, doi.org/10.1016/j.gr.2016.03.016.
- Coleman, D.S., Gray, W., and Glazner, A.F., 2004, Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California: *Geology*, v. 32, p. 433–436, doi.org/10.1130/G20220.1.
- Ernst, R. E., 2014, Large Igneous Provinces (LIPs). Cambridge University Press, doi.org/10.1017/CBO9781139025300.
- Ernst, R. E. and Jowitt, S. M., 2013, Large Igneous Provinces (LIPs) and Metallogeny. *Society of Economic Geologists Special Publication*, v. 17, no.2, p. 15-51, doi.org/10.5382/SP.17.02.
- Ferreira Filho, C.F., Naldrett, A.J., and Gorton, M.P., 1998, REE and pyroxene compositional variation across the Niquelândia layered intrusion, Brazil: Petrological and metallogenetic implications: *Applied Earth Sciences: Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, v. 107, p. 1–22, [orcid.org/0000-0002-7698-3459](https://doi.org/10.1002-7698-3459).

- Gao, J., John, T., Klemd, R., & Xiong, X., 2007, Mobilization of Ti–Nb–Ta during subduction: Evidence from rutile-bearing dehydration segregations and veins hosted in eclogite, Tianshan, NW China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 71, no. 20, p. 4974–4996. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.07.027>
- Godel, B., Barnes, S.-J., & Maier, W. D., 2011, Parental magma composition inferred from trace element in cumulus and intercumulus silicate minerals: An example from the Lower and Lower Critical Zones of the Bushveld Complex, South Africa. *Lithos*, 125(3–4), 537–552, doi.org/10.1016/j.lithos.2011.03.010.
- Grandin, G. and Zegarra, J., 1979, Las rocas ultrabásicas en el Perú; Las intrusiones lenticulares y los sills de la región Huánuco – Monzón. *Bol. Soc. Geol. Peru*, v. 63: p. 99 – 115.
- Guillon, J. H. and Zegarra, J., 1977, Las mineralizaciones Ni-Cu asociadas a los cuerpos de rocas ultrabásicas de la Cordillera Andina Oriental Del Perú. Estudio de la Zona Piloto de Chinchao (Dpto. de Huánuco). Acción Conjunta ORSTOM-INGEOMIN, informe final, segunda parte, Lima, Perú.
- Glazner A.F., Bartley J.M., Coleman D.S., Gray W. and Taylor R.Z., 2004, Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? *GSA Today* v. 14, no. 4/5, p. 4–11, [doi.org/10.1130/1052-5173\(2004\)014<0004:APAOMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/1052-5173(2004)014<0004:APAOMO>2.0.CO;2).
- Han, Y., Liu, Y. and Li, W., 2020, Mineralogy of Nickel and Cobalt Minerals in Xiarihamu Nickel–Cobalt Deposit, East Kunlun Orogen, China. *Frontiers in Earth Science*, 8, Article 597469, doi.org/10.3389/feart.2020.597469.
- He, H-L., Chen, L-M., Song, X-Y., Fu, B., Yi, J-N., Yu, S-Y. and Deng, Y-F., 2022, Genesis of the Xiarihamu Magmatic Ni-Co Sulfide Deposit in the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau: In Situ Oxygen Isotope and Geochemical Perspectives. *Economic Geology*; v. 117, no. 8, p. 1827–1844, doi.org/10.5382/econgeo.4949.
- Kutyrev, A., Zelenski, M., Nekrylov, N., Savelyev, D., Kontonikas-Charos, A., & Kamenetsky, V. S., 2021, Noble metals in arc basaltic magmas worldwide: A case study of modern and pre-historic lavas of the Tolbachik Volcano, Kamchatka. *Frontiers in Earth Science*, 9, 791465, doi.org/10.3389/feart.2021.791465.
- Latypov, R. M., Chistyakova, S. Yu., Namur, O. and Barnes, S., 2020, Dynamics of evolving magma chambers: textural and chemical evolution of cumulates at the arrival of new liquidus phases. *Earth-Science Reviews*, v. 210, 103388, doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103388.
- Lee, C.T., Leeman, W. P., Canil, D. and Li, Z.X., 2005, Similar V/Sc Systematics in MORB and Arc Basalts: Implications for the Oxygen Fugacities of their Mantle Source Regions. *Journal of Petrology*, v. 46, p. 2313–2336, doi.org/10.1093/petrology/egi056.
- Leshner C.M., 2019, Up, down, or sideways: emplacement of magmatic Fe-Ni-Cu-PGE sulfide melts in large igneous provinces. *Can J Earth Sci* v. 56, p. 756–773, doi.org/10.1139/cjes-2018-0177.
- Li, C., Zhang, Z., Li, W., Wang, Y., Sun, T. and Ripley, E. M., 2015, Geochronology, petrology and Hf–S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni–Cu sulfide deposit in the Qinghai–Tibet plateau, western China. *Lithos*, v. 216–217, p. 224–240, doi.org/10.1016/j.lithos.2015.01.003.
- Li, Z.X. and Lee, C.T., 2004, The constancy of upper mantle fO_2 through time inferred from V/Sc ratios in basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 228, p. 483–493, doi.org/10.1016/j.epsl.2004.10.006.
- Li, C. and Ripley, E.M., 2011, The giant Jinchuan Ni–Cu–(PGE) deposit: tectonic setting, magma evolution, ore genesis and exploration implications. *Reviews in Economic Geology* 17, 163–180.
- Liu, Y., Li, W., Jia, Q., Zhang, Z., Wang, Z., Zhang, Z., Zhang, J. and Qian, B., 2018, The Dynamic Sulfide Saturation Process and a Possible Slab Break-off Model for the Giant Xiarihamu Magmatic Nickel Ore Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Qinghai–Tibet Plateau, China. *Economic Geology*, v. 113, no. 6, p. 1383–1417, doi.org/10.5382/econgeo.2018.4596.
- Lu, Y., Leshner, C. M. and Deng, J., 2019, Geochemistry and genesis of magmatic Ni-Cu-(PGE) and PGE-(Cu)-(Ni) deposits in China. *Ore Geology Reviews*, v. 107, p. 863–887, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.03.024.

- McLaughlin, D.H., 1924, Geology and Physiography of the Peruvian Cordillera, Departments of Junin and Lima. Geological Society of America Bulletin, v. 35, no. 3, p. 591-632, doi.org/10.1130/GSAB-35-591.
- Mao, Y., Qin, K., Barnes, S. J., Ferraina, C., Iacono-Marziano, G., Verrall, M., Tang, D. and Xue, S., 2017, A revised oxygen barometry in sulfide-saturated magmas and application to the Permian magmatic Ni–Cu deposits in the southern Central Asian Orogenic Belt. Mineral Deposita, v. 53, p. 731–755, doi.org/10.1007/s00126-017-0771-3.
- Martins, V. B. and Ferreira Filho, C. F., 2018, The Caboclo dos Mangueiros Deposit: Ni-Cu Sulfide Mineralization Hosted by an Ultramafic Intrusion in the Northern Edge of the São Francisco Craton, Brazil. Economic Geology, v. 113, no. 7, p.1525–1552, doi.org/10.5382/econgeo.2018.4601.
- Mégard, F., 1978, Etude géologique des Andes du Pérou Central. Contribution a l'étude géologique des Andes N° 1. Mémoire ORSTROM no. 86, p. 310, doi.org/10.4000/books.ifea.1450.
- Misión Española, 1983, Reconocimiento geológico del area de reserva nacional Chinchao – Perú. Acuerdo Cooperación Minera Hispano Peruano.
- Mišković, A., Schaltegger, U., Spikings, R.A., Chew, D.M. and Košler, J., 2009, Tectono-magmatic evolution of western Amazonia: geochemical characterisation and zircon U–Pb geochronologic constraints from the Peruvian Eastern Cordilleran granitoids. Geological Society of America Bulletin v. 121, p. 1298–1324, doi.org/10.1130/B26488.1.
- Mota-e-Silva, J. M., Ferreira Filho, C. F., Bühn, B. and Dantas, E. L., 2011, Geology, petrology and geochemistry of the “Americano do Brasil” layered intrusion, central Brazil, and its Ni–Cu sulfide deposits. Miner Deposita, v. 46, p. 57–90, doi.org/10.1007/s00126-010-0312-9.
- Mota-e-Silva, J., Ferreira Filho, C.F. and Della Giustina, M.E.S., 2013, The Limoeiro deposit: Ni– Cu–PGE sulfide mineralization hosted within an ultramafic tubular magma conduit in the Borborema Province. Northeast. Braz. Economic Geology, v. 108, p. 1753–1771, doi.org/10.2113/econgeo.108.7.1753.
- Naldrett, A.J., 1998, World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis: Mineralium Deposita, v. 34, no.3, p. 227–240, [doi:10.1007/s001260050200](https://doi.org/10.1007/s001260050200).
- Naldrett, A.J. and Lightfoot, P.C., 1999, Ni-Cu-PGE deposits of the Noril'sk region, Siberia; their formation in conduits for flood basalt volcanism. In: Keays, R.R., Leshner, C.M., Lightfoot, P.C., Farrow, C.E.G. (Eds.), Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and their Application in Mineral Exploration. Geological Association of Canada, Short Course, 13: p. 195–249.
- Naldrett, A. J., 2004, Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, doi.org/10.1007/978-3-662-08444-1.
- Naldrett, A., 2011, Fundamentals of magmatic sulfide deposits. Chapter 1 in: Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry and Genesis. Li, C. and Ripley, E. M. Reviews in Economic Geology, v. 17, p. 1–50, doi.org/10.1111/j.1751-3928.2012.00198.x.
- Namur, O., Higgins, M.D. and Vander Auwera, J., 2015, The Sept Iles Intrusive Suite, Quebec, Canada. In: Charlier, B., Namur, O., Latypov, R., Tegner, C. (Eds.), Layered Intrusions, 1st ed. Springer, p. 465–515, doi.org/10.1007/978-94-017-9652-1_11.
- Pearce, J. A., 2008, Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. Lithos, v. 100, no. 1–4, p. 14–48, doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016.
- Pearce, J.A., and Reagan, M.K., 2019, Identification, classification, and interpretation of boninites from Anthropocene to Eoarchean using Si-Mg-Ti systematics. Geosphere, v. 15, no. 4, p. 1008-1037, doi.org/10.1130/GES01661.1.
- Piña, R., Romeo, I., Ortega, L., Lunar, R., Capote, R., Gervilla, F., Tejero, R. and Quesada, C., 2010, Origin and emplacement of the Aguablanca magmatic Ni- Cu-(PGE) sulfide deposit, SW Iberia: A multidisciplinary approach. Geological Society of America Bulletin, v. 122, p. 915–925, doi.org/10.1130/B30046.1.

Queffurus, M. and Barnes, S.-J., 2015, A review of sulfur to selenium ratios in magmatic nickel–copper and platinum-group element deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 69, p. 301–324, doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.02.019.

Robertson, J.C., Barnes, S.J. and Le Vaillant, M., 2015, Dynamics of magmatic sulphide droplets during transport in silicate melts and implications for magmatic sulphide ore formation. *Journal of Petrology*, v.56, p. 2445–2472, doi.org/10.1093/petrology/egv078.

Rodrigues, J.F., Acosta, J., Macharé, J., Pereira, E. And Castroviejo, R., 2010, Evidencias estructurales de aloctonía de los cuerpos ultramáficos y máficos de la Cordillera Oriental del Perú en la Región de Huánuco. Simposio S3_Bloques Litosféricos de la Cadena Andina. In: XV Congreso Peruano de Geología.

Rosas, S., Fontboté, L. and Tankard, A., 2007, Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucará Basin, central Peru. *Journal of South American Earth Sciences* v. 24, p. 1–24, doi.org/10.1016/j.jsames.2007.03.002.

Shishkina, T.A., Portnyagin, M.V., Botcharnikov, R.E., Almeev, R.R., Simonyan, A.V., Garbe-Schönberg, D., Schuth, S., Oeser, M. and Holtz, F., 2018, Experimental calibration and implications of olivine–melt vanadium oxybarometry for hydrous basaltic arc magmas. *American Mineralogist*, v. 103, p. 369–383, doi.org/10.2138/am-2018-6210.

Song, X. Y., Wang, K. Y., Barnes, S. J., Yi, J. N., Chen, L. M. and Schoneveld, L. E., 2020, Petrogenetic insights from chromite in ultramafic cumulates of the Xiarihamu intrusion, northern Tibet Plateau, China. *American Mineralogist*, v. 105, no. 4, p. 479–497, doi.org/10.2138/am-2020-7222.

Song, X.Y., Yi, J.N., Chen, L.M., Yu, S.Y., Liu, C.Z., Dang, X.Y., Yang, Q.A. and Wu, S.K., 2016, The Giant Xiarihamu Ni-Co Sulfide Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China. *Economic Geology*, v. 111, p. 29–55, doi.org/10.2113/econgeo.111.1.29

Sossi, P. A., Eggins, S. M., Nesbitt, R. W., Nebel, O., Hergt, J. M., Campbell, I. H., O'Neill, H. St.C., Van Kranendonk, M., and Davies, D. R., 2016, Petrogenesis and Geochemistry of Archean Komatiites. *Journal of Petrology*, v. 57, no. 3, p. 1–38, doi.org/10.1093/petrology/egw004.

Spikings, R., Reitsma, M.J., Boekhout, F., Mišković, A., Ulianov, A., Chiaradia, M., Gerdes, A. and Schaltegger, U., 2016, Characterisation of Triassic rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea, *Gondwana Research*, v. 35, p. 124–143, doi.org/10.1016/j.gr.2016.02.008.

Sproule, R. A., Sutcliffe, R., Tracanelli, H. and Leshner, C. M., 2007, Palaeoproterozoic Ni–Cu–PGE mineralisation in the Shakespeare intrusion, Ontario, Canada: a new style of Nipissing gabbro-hosted mineralisation. *Applied Earth Science*, v. 116 no. 4, p. 188–200, doi.org/10.1179/174327507X207492.

Sun, C. and Liang, Y., 2013, The importance of crystal chemistry on REE partitioning between mantle minerals (garnet, clinopyroxene, orthopyroxene, and olivine) and basaltic melts. *Chemical Geology*, v. 358, p. 23–36, doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.08.045.

Tassinari, C.C.G., Castroviejo, R., Rodrigues, J.F., Acosta, J. and Pereira, E., 2011, A Neoproterozoic age for the chromitite and gabbro of the Tapo ultramafic massif, Eastern Cordillera, Central Peru and its tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences* v. 32, p. 429–437, doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.008.

Wager, L.R. and Brown, G.M., 1968, *Layered Igneous Rocks*. Oliver and Boyd, Edinburgh and London.

Wilson, J. and Reyes, L., 1964, Geología del cuadrángulo de Pataz (Hoja 16-h). Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín, v. 9, p. 91, hdl.handle.net/20.500.12544/169.

Zhang, H., Tang, Q., Li, C., Wang, Y. and Ripley, E. M., 2017, Sr–Nd–Os–S isotope and PGE geochemistry of the Xiarihamu magmatic sulfide deposit in the Qinghai–Tibet plateau, China. *Miner Deposita*, v. 52, p. 51–68, doi.org/10.1007/s00126-016-0645-0.

Zheng, Y.-F., 2019, Subduction zone geochemistry. *Geoscience Frontiers*, v. 10, no.4, p. 1223–1254, doi.org/10.1016/j.gsf.2019.02.003.