

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Towards an Integrated Understanding of  
Paleoproterozoic (ca 2.1 to 1.70 Ga) Magmatism of  
the Southern Amazon Craton: Tracking Crustal  
Evolution and Magmatic Fertility at Columbia Margin**

**José Eduardo Zimmermann da Silva Martins**

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Recursos  
Minerais e Hidrogeologia para obtenção do  
título de Mestre em Ciências

Area de concentração: Recursos Minerais e  
Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

SÃO PAULO  
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGC/USP  
Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)  
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:  
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Zimmermann da Silva Martins, José Eduardo  
Towards an Integrated Understanding of  
Paleoproterozoic (ca 2.1 to 1.70 Ga) Magmatism of  
the Southern Amazon Craton: Tracking Crustal  
Evolution and Magmatic Fertility at Columbia Margin  
/ José Eduardo Zimmermann da Silva Martins;  
orientador Caetano Juliani. -- São Paulo, 2023.  
103 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação  
em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto  
de Geociências, Universidade de São Paulo, 2023.

1. Magmatic Arc Fertility. 2. Porphyry-  
Epithermal. 3. Paleoproterozoic Orogen. 4. Amazon  
Craton. 5. Columbia Supercontinent. I. Juliani,  
Caetano , orient. II. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Towards an Integrated Understanding of  
Paleoproterozoic (ca 2.1 to 1.70 Ga) Magmatism of  
the Southern Amazon Craton: Tracking Crustal  
Evolution and Magmatic Fertility at Columbia Margin**

**JOSÉ EDUARDO ZIMMERMANN DA SILVA MARTINS**

Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

Dissertação de Mestrado

**Nº 925**

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Caetano Juliani

Dra. Márcia Abrahão Moura

Dr. Carlos Marcello Dias Fernandes

SÃO PAULO  
2023

*Dedico este trabalho a minha amada  
esposa, Maria.*

## **Agradecimentos**

A minha esposa Maria, pelo apoio e compreensão durante a execução desse trabalho. Aos meus pais, Liamar e José Aparecido, e a meu irmão João Vitor, pelo constante apoio e incentivo desde sempre.

Ao meu orientador Prof. Dr. Caetano Juliani, pela parceria e apoio durante este trabalho e pela generosidade em compartilhar seu vasto conhecimento geológico. A banca da qualificação, composta por Dr. Marcelo Galé e Rafael de Assis, e a banca da defesa, composta pela Dra. Márcia Moura e Carlos Fernandes, pela excelente contribuição a este trabalho com suas sugestões e correções.

Aos colegas das empresas Nexa Resources e AngloGold Ashanti que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho, e as citadas empresas pelas oportunidades de ampliar a experiência em diferentes ambientes geológicos.

A todos os pesquisadores e profissionais que produziram conteúdo que foi referenciado nesse trabalho, sem os quais não seria possível a execução.

A Universidade de São Paulo, ao Estado de São Paulo e aos cidadãos brasileiros pela oportunidade de cursar esse mestrado

## Resumo

O magmatismo paleoproterozóico do Cráton Amazônico Sul (ca. 2.1 a 1.7 Ga) produziu importantes mineralizações de ouro e metais básicos que estão parcialmente localizados nas Províncias Minerais Tapajós (PMT) e Juruena (PMJ).

Estes terrenos acrecionários posicionados a oeste do embasamento arqueano-paleoproterozoico compreendem rochas plutônicas e vulcânicas cálcio-alcálicas e alcalinas não deformadas e não metamorfizadas. A compreensão do ambiente tectônico em que ocorreu esse extenso magmatismo tem evoluído constantemente nas últimas décadas, assim como o entendimento e classificação dos sistemas metalogênicos associados (ouro orogênico, *IRGD*, pórfiro-epitermal etc.).

Mais recentemente a região tem sido foco de intensa exploração mineral após a descoberta de um típico sistema pórfiro de Cu-Mo na PMJ. No entanto, o potencial para depósitos pórfiro-epitermais tem sido evidenciado desde a descoberta de um depósito epitermal de alta sulfetação na PMT durante a década de 1990. Portanto, o potencial mineral dessas províncias ainda não foi completamente entendido e explorado.

Características inerentes à região, uma extensa área coberta por floresta tropical, e a falta de trabalhos integrados e abrangentes têm impedido a elaboração de um quadro evolutivo confiável e critérios confiáveis de exploração mineral.

Neste trabalho, realizamos uma compilação e análise abrangente de dados para desvendar a evolução crustal e magmática dos cinturões acrecionários do Cráton Sul Amazônico e da fertilidade para depósitos magmático-hidrotermais. O trabalho permitiu construir um robusto banco de dados geocronológicos, isotópicos e litogeoquímicos inédito, que foi analisado seguindo métodos já estabelecidos pela indústria de exploração e academia, usando ferramentas de análise de dados modernas.

Três períodos magmáticos principais foram definidos e subdivididos em 7 épocas magmáticas com base em características temporais, geoquímicas e isotópicas: Primeiro Período Magmático: ca. 2070 a 1915 Ma (155 Ma, 3 épocas); Segundo Período Magmático: ca. 1915 a 1830 Ma (85 Ma, 2 épocas), e Terceiro Período Magmático: ca. 1830-1730 (100 Ma, 2 épocas).

O Primeiro e o Segundo Períodos representam arcos magmáticos continentais totalmente desenvolvidos que iniciaram com magmatismo cálcio-alcálico relacionado

à subducção, e transicionaram para ambiente tardi- e pós-tectônico com predominância de rochas evoluídas do tipo-A. O Terceiro Período se iniciou como um arco magmático cálcio-alcálico que rapidamente transicionou para um ambiente de retroarco com extenso magmatismo do tipo A. Estes arcos desenvolveram-se como resultados de uma prolongada orogenia acrecionária instalada sobre crosta arqueana/paleoproterozóica no contexto da aglutinação do Supercontinente Columbia, fazendo parte do Grande Orógeno Acrecionário Paleoproterozóico.

As variações de ambiente e petrogênese identificadas são fortemente sugestivas de mudanças no regime tectônico causadas por variações do ângulo da subducção, alternando períodos de extensão causados por *slab rollback*, e períodos compressivos caldos por *flat subduction*, evidenciados pelos dados isotópicos de Nd.

O estudo de fertilidade magmática realizado demonstrou que o conteúdo de água do magmatismo, evidenciado pela razão Sr/Y, varia de acordo com a composição e o ambiente, assim como as condições de fertilidade. Rochas de alto Sr/Y, oxidadas e hidratadas são comuns durante os períodos de magmatismo cálcio-alcálico relacionado à subducção, o que lhes confere potencial para a formação de pórfiros típicos de Cu-Au-Mo e sistemas epitermais de alta sulfetação. Rochas anidras do tipo A, com baixo Sr/Y, predominam nos ambientes de pós-subducção e retroarco e são dotadas de potencial para pórfiros ricos em Au e sistemas epitermais alcalinos.

Portanto, os resultados obtidos neste trabalho definem um melhor entendimento da evolução crustal e magmática da região e o potencial metalogenético associado, possibilitando o estabelecimento de melhores critérios para exploração mineral e pesquisa acadêmica. Além disso, detalha a evolução e características de um dos maiores e mais bem preservados ramos do Grande Orógeno Acrecionário Paleoproterozóico, e da tectônica que operou durante a aglutinação do Supercontinente Columbia.

Palavras-chave: Fertilidade de Arcos Mágmatícos; Pórfiro-Epitermal; Orógeno Paleoproterozóico; Cráton Amazônico; Supercontinente Columbia.

## Abstract

The Paleoproterozoic magmatism of the Southern Amazon Craton (ca. 2.1 to 1.7 Ga) produced important gold and base metals mineralization that are partially comprised within the Tapajós and Juruena Mineral Provinces.

These accretionary terranes positioned to the west of Archean-Paleoproterozoic basement comprises extensive predominantly undeformed and unmetamorphosed plutonic and volcanic calc-alkaline to alkaline rocks. The understanding of the tectonic setting in which such extensive magmatism took place has been developing and debated in the last decades, so do the understanding and classification of associated metallogenic systems (orogenic gold, IRGD, porphyry-epithermal etc.).

More recently the region has been on focus of an exploration rush after the discovery of a typical Cu-Mo porphyry system at the JMP. Nevertheless, the potential for porphyry-epithermal deposits has been highlighted since the discovery of high-sulfidation epithermal deposits at TMP in the 1990s. Therefore, the full mineral potential of these provinces has not been completely accessed yet.

Inherent characteristics of the region, a wide tropical forest cover with hard access, and the lack of integrated and comprehensive works has impeded the elaboration of a reliable evolutionary history and mineral exploration criteria.

In this work we performed comprehensive data compilation and data-driven assessments to unwrap the crustal and magmatic evolution in the accretionary belts of the Southern Amazon Craton and resulting fertility for magmatic-hydrothermal mineral deposits. The compilation work allowed to build a robust and unprecedented geochronological, isotopic and lithogeochemical database that was assessed following established scientific and industry methods using modern data analytics tools.

Three main magmatic periods were defined and sub-divided in 7 magmatic epochs based on temporal, geochemical and isotopic characteristics: First Magmatic Period: ca. 2070 to 1915 Ma (155 Ma, 3 epochs); Second Magmatic Period: ca. 1915 to 1830 Ma (85 Ma, 2 epochs), and Third Magmatic Period: ca. 1830-1730 (100 Ma, 2 epochs). The First and Second Periods represent fully developed continental magmatic arcs that initiated with subduction-related extended calc-alkaline magmatism that transition to late- and post-tectonic settings when A-type evolved rocks were produced. The Third Period initiated as a calc-alkaline magmatic arc that quickly shifted to a back-arc setting also with voluminous production of A-type rocks. These arcs developed as



results of a protracted accretionary orogeny installed over Archean/Paleoproterozoic crust in the context of Columbia Supercontinent assembling, being part of the Great Paleoproterozoic Accretionary Orogen.

The variations of environment and petrogenesis identified are strongly suggestive of changes in the tectonic regime caused by variations of the angle of subducting plate, alternating periods of slab-rollback and extension, and periods of flat subduction and compression disclosed by Nd isotopic data.

The fertility assessment performed demonstrated that the water content of magmatism constrained by Sr/Y and related ratios varies accordingly to the composition and environment, so do the fertility conditions. High Sr/Y, oxidized, and hydrous rocks are common during the periods of subduction-related calc-alkaline magmatism and are endowed for the formation of typical Cu-Au-Mo porphyries and high sulfidation epithermal systems. Low Sr/Y, A-type anhydrous rocks dominates in the post-subduction and back-arc tectonic settings and are endowed with potential for Au-enriched porphyries and alkalic epithermal systems.

Therefore, the results obtained in this work define a better understanding of crustal-magmatic evolution for the region and the associated metallogenetic potential, enabling better criteria for mineral exploration and academic research. Also, it is a significant portraying of one of the biggest and better-preserved branches of the Great Paleoproterozoic Accretionary Orogen and on the tectonics that operated during the assembling of Columbia Supercontinent.

**Keywords:** Magmatic Arc Fertility; Porphyry-Epithermal; Paleoproterozoic Orogen; Amazon Craton; Columbia Supercontinent.



# 1. INTRODUÇÃO

O magmatismo Paleoproterozoico do Cráton Sul Amazônico produziu importantes ocorrências de ouro e metais de base que estão parcialmente localizados nas Províncias Minerais do Tapajós (PMT) e Juruena (PMJ) (Juliani et al., 2021).

A importância econômica dessas províncias, especialmente no que diz respeito ao ouro, começou a emergir a partir do final da década de 1950, quando foram descobertas as primeiras jazidas aluvionares e iniciadas as atividades de garimpo na região, levando ao estabelecimento de várias áreas garimpeiras produtoras de ouro nas décadas seguintes (Faraco et al., 1997; Santos et al., 2001).

Posteriormente, os depósitos primários de alto teor também começaram a ser explorados em pequena escala e, desde então, ambas as províncias têm sido responsáveis por produções significativas de ouro aproximadamente estimadas em 900 t para TPM e 250 t JMP (Juliani et al., 2021). Na última década, os garimpos adotaram processos de mecanização, se profissionalizaram e organizaram em cooperativas de garimpeiros, o que melhorou a capacidade de atender às regulamentações minerais e legais.

Embora a principal produção da região ainda seja o ouro aluvionar em garimpos, pequenas e médias minas primárias estão em operação (Mina União-Au; Mina Paraíba - Au.), em estudo de viabilidade (X1, Serrinha, Serra do Guarantã), ou em construção, que é o caso do depósito de ouro Tocantinzinho na PMT, a maior jazida conhecida na região.

Em relação ao potencial para metais de base, a partir de 2017 a região vivenciou um intenso ciclo de atividades de exploração mineral devido a descoberta de um típico sistema pórfiro de Cu-Mo pela exploração mineral da empresa Anglo American, o Pórfiro Jaca. (Juliani et al., 2021). No entanto, o potencial para existência de sistemas pórfiro-epitermais associados ao magmatismo paleoproterozoico já vem sendo evidenciado desde a descoberta de depósitos epitermais de alta sulfidação pela Rio Tinto na década de 1990 na Província Mineral do Tapajós, associados a rochas vulcânicas cálcio-alcálicas de 1,88 Ga. (Juliani et al., 2000; 2002; 2005). No entanto, é evidente que o potencial mineral destas províncias ainda não foi completamente explorado.

A compreensão do ambiente tectônico no qual ocorreu um magmatismo tão extenso vindo evoluindo e sendo debatida nas últimas décadas. Na mesma medida tem evoluído a classificação dos sistemas metalogenéticos associados, coexistindo na literatura categorizações de ouro orogénico, *IRGD* e pórfiro-epitermal.

Mas as características inerentes à região, tal como grande extensão em área, cobertura vegetal, difícil acesso e escassos afloramentos, falta de dados ou dados somente em escala regional, informação mal distribuída e interpretação enviesada, somadas as incertezas relativas a tectônica atuante no Paleoproterozóico, têm impedido a elaboração de modelos integrados e abrangentes tanto para a evolução tectônica como para a metalogenia.

No entanto, nos últimos 20 anos foram publicados numerosos trabalhos de investigação acadêmica sobre a região. Estes trabalhos centram-se principalmente em geocronologia, isótopos radiogênicos, petrologia e litogeoquímica, geralmente em escala local ou semi-regional. O crescente número de dados disponíveis fornece a oportunidade de buscar um entendimento mais integrado do Magmatismo Paleoproterozóico do Cráton Sul Amazônico.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi compilar, integrar, avaliar e interpretar três tipos principais de informações geológicas: Geocronologia; Litogeoquímica e Isótopos de Nd.

Através dessa abordagem surgiram importantes elucidações sobre a distribuição espacial, temporal, evolução e fertilidade magmática do magmatismo Paleoproterozóico e eventos mineralizantes relacionados, bem como um melhor entendimento da evolução crustal para o Cráton Sul Amazônico.

## 5.10 - Conclusions

In this work we performed comprehensive data compilation and data-driven assessments to unwrap the crustal and magmatic evolution of the Paleoproterozoic Magmatism of Southern Amazon Craton and resulting fertility for magmatic-hydrothermal mineral deposits.

The compilation work allowed to build a robust and unprecedented geochronological, isotopic and lithogeochemical database that was assessed following established scientific and industry methods using up to date data analytics tools. This resulted in important insights that might be useful for research and mineral exploration in the region.

Paleoproterozoic magmatism was divided in three magmatic periods: **First Magmatic Period:** ca. 2070 to 1915 Ma (155 Ma); **Second Magmatic Period:** ca. 1915 to 1830 Ma (85 Ma), and **Third Magmatic Period:** ca. 1830-1730 (100 Ma). The periods were sub-divided in 7 magmatic epochs based on temporal, geochemical and isotopic characteristics.

The First and Second Periods represent fully developed continental magmatic arcs that initiated with subduction-related extended calc-alkaline magmatism that transition to late- and post-tectonic settings when A-type evolved rocks were produced. The Third Period initiated as a calc-alkaline magmatic arc that quickly shifted to a back-arc setting also with voluminous production of A-type rocks.

These arcs developed as results of a protracted accretionary orogeny installed over Archean/Paleoproterozoic crust in the context of Columbia Supercontinent assembling, being part of the Great Paleoproterozoic Accretionary Orogen.

The variations of environment and petrogenesis identified are strongly suggestive of changes in the tectonic regime caused by variations of the angle of subducting plate, alternating periods of slab-rollback and extension, and periods of flat subduction and compression evidenced by Nd isotopic data.

The fertility assessment performed demonstrated that the water content of magmatism constrained by Sr/Y and related ratios varies accordingly to the composition and environment, so do the fertility conditions. High Sr/Y, oxidized, and hydrous rocks are

common during the periods of subduction-related calc-alkaline magmatism and are endowed for the formation of typical Cu-Au-Mo porphyries and high sulfidation epithermal systems. Low Sr/Y, A-type anhydrous rocks dominates in the post-subduction and back-arc tectonic settings and are endowed with potential for Au-enriched porphyries and alkalic epithermal systems.

Mineralization and hydrothermal alteration ages define an apparent 19 Ma long mineralization epoch at Juruena Mineral Province (from ca. 1805 to 1786 Ma), temporarily and spatially related to the Third Magmatic Period. At Tapajós Mineral Province a 13 Ma mineralization epoch (from ca. 1854 – 1867) is related to Second Magmatic Period.

New data will detail the already defined metallogenic epochs and new mineralizing events might emerge for the region. The better understanding of timing and mineralization styles from the region will also permit to test the evolutionary history predicted in this work.

## 6. Referências Bibliográficas

- Alcântara, D.D.C.B.G., 2023, Geologia, geoquímica e isótopos (U-Pb, Lu-Hf e Sm-Nd) de granitos orosirianos do Domínio Iriri-Xingu setentrional, Província Amazônia Central. [Dissertação de Mestrado]: Pará, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 94p.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., de Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981, Brazilian structural provinces: an introduction: *Earth-Science Reviews*, v. 17, no.1-2, p. 1-29.
- Alves, C.L., Rizotto, G.J., Rios, F.S., Gonçalves, G.F., 2019, Áreas de relevante interesse mineral – Projeto evolução crustal e metalogenia da Província Mineral Juruena-Teles Pires: informe de recursos minerais, Série Províncias Mineraias do Brasil, 22. Goiânia: CPRM, 226p.
- Alves, C.L., Rizzotto, G.J., Rios, F.S., Barros, M.A.D.S.A., 2020, The Orosirian Cuiú-Cuiú magmatic arc in Peixoto de Azevedo domain, Southern of Amazonian craton: *Journal of South American Earth Sciences*, v.102, 102648.
- Amaral, G., 1974, Geologia Pré-cambriana da Região Amazônica. [Tese de Livre Docência]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 212p.
- Assis R. R. (2015). Depósitos auríferos associados ao magmatismo félsico da Província de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico: litogeoquímica, idade das mineralizações e fonte dos fluidos. Tese (Doutorado). Campinas: Instituto de Geociências, Unicamp, 363p.
- Assis, R.R., 2011, Depósitos auríferos associados ao magmatismo granítico do setor leste da Província de Alta Floresta (MT), Craton Amazônico: tipologia das mineralizações, modelos genéticos e implicações prospectivas. [Dissertação de Mestrado]: Campinas, UNICAMP, Instituto de Geociências, 428f.
- Assis, R.R., Xavier, R.P., Creaser, R.A., 2017, Linking the timing of disseminated granite-hosted gold-rich deposits to Paleoproterozoic felsic magmatism at Alta Floresta gold province, Amazon craton, Brazil: Insights from pyrite and molybdenite Re-Os geochronology: *Economic Geology*, v. 112, no. 8, p. 1937-1957.
- Baldwin, J.A., Pearce, J.A., 1982, Discrimination of productive and nonproductive porphyritic intrusions in the Chilean Andes: *Economic Geology*, v. 77, no. 3, p. 664-674.
- Barros, A.J.P. 1994, Contribuição a geologia e controle das mineralizações auríferas de Peixoto de Azevedo-MT. [Dissertação de mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 145 p.
- Borgo, A., Biondi, J.C., Chauvet, A., Bruguier, O., Monie, P., Baker, T., Mortensen, J., 2017, Geochronological, geochemical and petrographic constraints on the Paleoproterozoic Tocantinzinho gold deposit (Tapajos Gold Province, Amazonian Craton-Brazil): Implications for timing, regional evolution and deformation style of its host rocks: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 75, p. 92-115.
- Carneiro, C. de C.; Juliani, C.; Carreiro-Araujo, S.A.; Monteiro, L.V.S.; Crosta, A.P.; Fernandes, C.M.D. New Crustal Framework in the Amazon Craton Based

- on Geophysical Data: Evidences of Deep East-West Trending Suture Zones. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 2019, 16, 20–24, doi:10.1109/LGRS.2018.2867551.
- Cassini, L.V., Moyon, J.F., Cellier, G., de Freitas, B., Juliani, C., Laurent, O., 2022, Towards the fertility trend: Unraveling the economic potential of igneous suites through whole-rock and zircon geochemistry (example from the Tapajós mineral Province, Northern Brazil): *Ore Geology Reviews*, v. 142, 104643.
- Champion, D.C., Huston, D.L., 2016, Radiogenic isotopes, ore deposits and metallogenic terranes: Novel approaches based on regional isotopic maps and the mineral systems concept: *Ore Geology Reviews*, v. 76, p. 229-256.
- Champion, D.C., Huston, D.L., 2023, Applications of Neodymium Isotopes to Ore Deposits and Metallogenic Terranes; Using Regional Isotopic Maps and the Mineral Systems Concept: *Isotopes in Economic Geology, Metallogenesis and Exploration*, p.123-154.
- Chiaradia, M., 2023, Radiometric dating applied to ore deposits: theory and methods: *Isotopes in Economic Geology, Metallogenesis and Exploration*, p. 15-35.
- Chiaradia, M., Ulianov, A., Kouzmanov, K., Beate, B., 2012, Why large porphyry Cu deposits like high Sr/Y magmas?: *Scientific reports*, v. 2, no.1, p. 685.
- Cohen, D. R. et al., 2010, Major advances in exploration geochemistry, 1998–2007, p. 3-16.
- Collins, W.J., 2002. Hot orogens, tectonic switching, and creation of continental crust. *Geology* 30, 535–538.
- Condie, K.C., 2013, Preservation and recycling of crust during accretionary and collisional phases of Proterozoic orogens: a bumpy road from Nuna to Rodinia: *Geosciences*, v. 3, no. 2, p. 240-261.
- Cooke, D.R., Agnew, P., Hollings, P., Baker, M., Chang, Z., Wilkinson, J.J., Wilkinson, C.C., 2017, Porphyry indicator minerals (PIMS) and porphyry vectoring and fertility tools (PVFTS)–indicators of mineralization styles and recorders of hypogene geochemical dispersion halos: *Decennial Mineral Exploration Conferences*.
- Cordani, U.G., Neves, B.B.B., 1982, The geologic evolution of South America during the Archaean and Early Proterozoic: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 12, no. 1-3, p. 78-88.
- Cordani, U.G., Sato, K., 1999, Crustal evolution of the South American Platform, based on Nd isotopic systematics on granitoid rocks: *Episodes Journal of International Geoscience*, v. 22, no. 3, p. 167-173.
- Cordani, U.G., Tassinari, C.C.G., Teixeira, W., Basei, M.A.S., Kawashita, 1979, Evolução tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. In: *Congresso Geológico Chileno, 2, Arica (Chile). Actas*, p. 137-148.
- Cordani, U.G., Teixeira, W., D'Agrella-Filho, M.S., Trindade, R. I., 2009, The position of the Amazonian Craton in supercontinents: *Gondwana Research*, v. 15, no. 3-4, p. 396-407.
- Corrêa, L.W.C., Macambira, M.J. B., 2014, Evolução da região de Santana do Araguaia (PA) com base na geologia e geocronologia Pb-Pb em zircão de granitoides.



- Coutinho, M.G.d.N., Robert, F., dos Santos, R.A., 1997, A first approach in understanding the gold mineralization of Tapajós Mineral Province, Amazonian area, Brazil: Proceedings of the 10th International Gold Symposium; Minérios & Minerale, Rio de Janeiro, Brazil, 29–30 September 1997.
- Coutinho, M.G.D.N., 2008, Província Mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa previsional para ouro em SIG. Evolução Tectono-Geológica e Modelo de Mineralização de Ouro. CPRM. V.1, 299 – 326.
- De la roche, H. et al., 1980, A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major-element analyses—its relationships with current nomenclature: *Chemical geology*, v. 29, n. 1-4, p. 183-210.
- DePaolo, D.J., 1988, Age dependence of the composition of continental crust: evidence from Nd isotopic variations in granitic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 90, no. 3, p. 263-271.
- DePaolo, D.J., Perry, F.V., Baldrige, W.S., 1992, Crustal versus mantle sources of granitic magmas: a two-parameter model based on Nd isotopic studies: *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, v. 83, no. 1-2, p. 439-446.
- Ducea, M.N., Saleeby, J.B., Bergantz, G., 2015, The architecture, chemistry, and evolution of continental magmatic arcs: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 43, p. 299-331.
- Echeverri Misas, C. M., Juliani, C., 2015, Geologia e alteração hidrotermal nas rochas vulcânicas e plutônicas paleoproterozoicas na porção Sul da Província Mineral do Tapajós (PA). [Tese de Doutorado], Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 285 p.
- Echeverri-Misas, C. M., 2010, Geologia e gênese do depósito de Au-(Cu) do Palito, Província Aurífera do Tapajós. São Paulo. 178p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Faraco, M.T.L., Carvalho, J.M.A., Klein, E.L., 1997, Carta Metalogenética da Província Aurífera do Tapajós: Costa, M.L., Angélica, R.S. (Eds.), *Contribuições à Geologia da Amazônia*. SBG, Belém, pp. 423–437.
- Fernandes, C.M.D., Juliani, C. The tectonic control on the Paleoproterozoic volcanism and the associated metallogeny in the South Amazonian craton, Brazil: Sr-Nd-Pb isotope constraints. *Precambrian Research* 331, 105354.
- Fernandes, C.M.D., Juliani, C., Monteiro, L.V.S., Lagler, B., Misas, C.M.E., 2011, High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages?: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 32, no. 4, p. 351-368.
- Galé, M.G., da Costa, P.C.C., de Assis, R.R., Pinho, F.E.C., Juliani, C., 2018, Estudo de inclusões fluidas em quartzo do garimpo do Papagaio, um sistema magmático-hidrotermal, Província Aurífera de Alta Floresta (MT), Cráton Amazônico: *Geologia USP. Série Científica*, v. 18, no.1, p. 207-226.
- Groves, D. I., Santosh, M., Müller, D., Zhang, L., Deng, J., Yang, L. Q., Wang, Q. F., 2022, Mineral systems: Their advantages in terms of developing holistic genetic models and for target generation in global mineral exploration: *Geosystems and Geoenvironment*, v. 1, no,1, 100001.

- Guimaraes, S.B., Klein, E.L., 2020, Geochemical and isotopic constraints on the host rocks of the magmatic-hydrothermal Coringa gold-silver (Cu–Pb–Zn) deposit of the Tapajós mineral province, amazonian craton, Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 103, 102726.
- Gutierrez, D.F.G., Gomez, D.F., 2018, *Petrogênese e metalogenia do magmatismo Paleoproterozoico na porção Sul da Província Mineral do Tapajós, Craton Amazônico*. [Tese de Doutorado]: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 234 p.
- Harris, N.B.W.; Pearce, J. A.; Tindle, A.G., 1986, *Geochemical characteristics of collision-zone magmatism*: Geological Society, London, Special Publications, v. 19, n. 1, p. 67-81.
- Hartnady, C.J.H., 1995, Quantitative models of crustal growth: *South African Journal of Geology*, v. 98, no. 2, p. 101-111.
- Hawkesworth, C., Cawood, P., Dhuime, B., 2013, Continental growth and the crustal record: *Tectonophysics*, v. 609, p. 651-660.
- Huston, D.L., Mernagh, T.P., Hagemann, S.G., Doublie, M.P., Fiorentini, M., Champion, D.C., Bastrakov, E., 2016, Tectono-metallogenic systems—The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples: *Ore Geology Reviews*, v. 76, p. 168-210.
- Irvine, T. N.; Baragar, W. R. A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks: *Canadian journal of earth sciences*, v. 8, n. 5, p. 523-548.
- Jacobi, P. The discovery of epithermal Au-Cu-Mo Proterozoic deposits in the Tapajós Province, Brazil. *Rev. Bras. Geociências* 1999, 29, 277–279.
- Johansson, Å., Bingen, B., Huhma, H., Waight, T., Vestergaard, R., Soesoo, A., Condie, K.C., 2022, A geochronological review of magmatism along the external margin of Columbia and in the Grenville-age orogens forming the core of Rodinia: *Precambrian Research*, v. 371, 106463.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Vikre, P.G., 2010, Porphyry copper deposit model. Chapter B of *Mineral deposit models for resource assessment*: US Geological Survey Scientific Investigations Report, v. 169.
- Juliani, C., 2019, Epithermal and porphyry mineralization potential in well preserved Paleoproterozoic (ca. 2.0 to 1.78 Ga) continental magmatic arcs in the Amazonian Craton, Brazil: *Proceedings of the SEG 2019: Conference South American Metallogeny: Sierra to Craton*, Society of Economic Geologist, Santiago, Chile, 7–10 October 2019.
- Juliani, C., Assis, R.R., Monteiro, L.V.S., Fernandes, C.M.D., Martins, J.E.Z.S., Costa, R., Costa, J., 2021, Gold in Paleoproterozoic (2.1 to 1.77 Ga) continental magmatic arcs at the Tapajós and Juruena Mineral Provinces (Amazonian Craton, Brazil): a new frontier for the exploration of epithermal–porphyry and related deposits: *Minerals*, v. 11, no. 7, p. 714.
- Juliani, C., Corrêa-Silva, R. H., Monteiro, L.V., Bettencourt, J.S., Nunes, C.M., 2002, The Batalha Au–granite system—Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil: hydrothermal alteration and regional implications: *Precambrian Research*, v. 119, no. 1-4, p. 225-256.

- Juliani, C., Fernandes, C.M.D., 2010, Well-preserved late paleoproterozoic volcanic centers in the São Felix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 191, no. 3-4, p. 167-179.
- Juliani, C., Fernandes, C.M.D., Monteiro, L.V.S., Echeverri Misas, C.M., Lagler, B., 2009, Possível zonamento metalogenético associado ao evento vulcano-plutônico de ~ 2,0 a 1,88 Ga na parte sul do Cráton Amazônico. In: II Simpósio Brasileiro de Metalogênese.
- Juliani, C., Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Fernandes, C.M.D., 2008, Epithermal and porphyry-related Au and base-metal mineralizations in the Paleoproterozoic Uatumã magmatism-Tapajós Gold Province, Amazonian craton. In: 33rd Inter. Geol. Congr. Oslo, Norway.
- Juliani, C., Nunes, C.M., Bettencourt, J.S., Silva, R.H., Monteiro, L.V.S., Neumann, R., Rye, R. O., 2000, Early Proterozoic volcanic-hosted quartz-alunite epithermal deposits in the Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil: *Abstr. Programs – Geol. Soc. Am.* 32: A-49.
- Juliani, C., Rye, R.O., Nunes, C.M., Snee, L.W., Silva, R.H.C., Monteiro, L.V., Neto, A.A., 2005, Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints: *Chemical Geology*, v. 215, no. 1-4, p. 95-125.
- Juliani, C., Vasquez, M.L., Klein, E.L., Villas, R.N., Echeverri-Misas, C.M., Santiago, E.S. B., Monteiro, L.V.S., Carneiro, C.C., Fernandes, C.M.D., Usero, G., 2014, Metalogenia da Província Tapajós, *in* Silva, M.G., Jost, H., Kuyumajian, R.M., org., *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. 1: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, vol. 1, p.51–90.
- Kuno, H., 1968, Origin of andesite and its bearing on the island arc structure: *Bulletin Volcanologique* 32, p. 141-176.
- Lagler, B., Juliiani, C., Fernandes, C.M.D., Cruz, R.S., Vieira, D.A.S, 2019, Paleoproterozoic volcanic caldera in the Amazonian craton, northern Brazil: Stratigraphy, lithofacies characterization, and litho-geochemical constraints: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 95, 102252.
- Lamarão, C.N., Dall'Agnol, R., Pimentel, M.M., 2005, Nd isotopic composition of Paleoproterozoic volcanic and granitoid rocks of Vila Riozinho: implications for the crustal evolution of the Tapajós gold province, Amazon craton: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, no. 3-4, p. 277-292.
- Le maitre, R. W. et al., 1989, A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous rocks.
- Loucks, R.R., 2014, Distinctive composition of copper-ore-forming arc magmas: *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 61, no. 1, p. 5-16.
- Lu, Y.J., Loucks, R.R., Fiorentini, M.L., Yang, Z.M., Hou, Z.Q, 2015, Fluid flux melting generated postcollisional high Sr/Y copper ore-forming water-rich magmas in Tibet: *Geology*, v. 43, no. 7, p. 583-586.
- Mattinson, J. M. (2013). Revolution and evolution: 100 years of U–Pb geochronology. *Elements*, 9(1), 53-57.

- McCuaig, T.C., Beresford, S., Hronsky, J., 2010, Translating the mineral systems approach into an effective exploration targeting system: *Ore Geology Reviews*, v. 38, no. 3, p. 128-138.
- Middlemost, E. A., 1994, Naming materials in the magma/igneous rock system: *Earth-science reviews*, v. 37, n. 3-4, p. 215-224.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Souza Filho, C.R.D., Moreto, C.P.N., Jost, H., Kuyumjian, R.M., 2014, Metalogênese da província Carajás. *Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras*, p. 43-84.
- Motta, J. G., Souza Filho, C. D., Carranza, E. J. M., & Braitenberg, C. (2019). Archean crust and metallogenic zones in the Amazonian Craton sensed by satellite gravity data. *Scientific reports*, 9(1), 2565.
- Motta, J.G., Betts, P.G., Meira, V.T., Trevisan, V. G., Souza Filho, C.R., 2022, Unwrapping reworked crust at the Columbia supercontinent margin within central southern Amazon Craton using multi-source geophysics and geochronology data synergy: *Geoscience Frontiers*, v. 13, no. 3, 101348.
- Moura, M. A. (1998). O Maciço granítico Matupá no Depósito de ouro Serrinha (MT): Petrologia, alteração hidrotermal e metalogenia. Tese (Doutorado). Brasília: Instituto de Geociências, UnB. 241p.
- Moura, M. A., Botelho, N. F., Olívio, G. R., Kyser, T. K. (2006). Granite-related Paleoproterozoic, Serrinha gold deposit, Southern Amazonia, Brazil: hydrothermal alteration, fluid inclusion and stable isotope constraints on genesis and evolution. *Economic Geology*, 101, 585-605.
- Nathwani, C.L., Wilkinson, J.J., Fry, G., Armstrong, R.N., Smith, D. J., Ihlenfeld, C., 2022, Machine learning for geochemical exploration: classifying metallogenic fertility in arc magmas and insights into porphyry copper deposit formation: *Mineralium Deposita*, v. 57, no. 7, p. 1143-1166.
- Nunes, C.M.D.; Juliani, C.; Corrêa-Silva, R.H. Bettencourt, J.S.; Jacobi, P. Paleoproterozoic quartz–alunite epithermal gold mineralization from Tapajós (Brazil). In *Proceedings of the Special Symposia and General Symposia Abstracts Volume; IUGS/CPRM: Rio de Janeiro, 2000; p. [CD-ROM]*.
- Oliveira, H.T., Borges, R.M.K., Klein, E.L., Lamarão, C.N., Marques, G.T., Lima, R.G.C., 2018, Alteração hidrotermal e fluidos mineralizantes no alvo Jerimum de Baixo, Campo Mineralizado do Cuiú-Cuiú, Província Aurífera do Tapajós: um estudo baseado em petrografia, inclusões fluidas e química mineral: *Geologia USP. Série Científica*, v. 19, no. 1, p. 3-32.
- Oliveira, H.T.D., 2018, Estudo de inclusões fluidas e química mineral do depósito aurífero do alvo Jerimum de Baixo, campo mineralizado do Cuiú-Cuiú, província aurífera do Tapajós, Pará. [Dissertação de mestrado]: Pará, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 95p.
- Paterson, S.R., Okaya, D., Memeti, V., Economos, R., Miller, R.B., 2011, Magma addition and flux calculations of incrementally constructed magma chambers in continental margin arcs: Combined field, geochronologic, and thermal modeling studies: *Geosphere*, v. 7, no.6, p. 1439-1468.
- Pearce, J. A.; Harris, Nigel B.W; Tindle, A. G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks: *Journal of petrology*, v. 25, n. 4, p. 956-983.

- Pineschi, D., 2022, Geologia, geocronologia e metalogênese do Alvo-47, um novo prospecto de Cu±Au±Mo na Província de Alta Floresta (MT). [Tese de doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 105p.
- Potts, P.J., Webb, P.C., Thompson, M., 2015, Bias in the determination of Zr, Y and rare earth element concentrations in selected silicate rocks by ICP-MS when using some routine acid dissolution procedures: Evidence from the GeoPT proficiency testing programme: *Geostandards and Geoanalytical Research*, v. 39, no. 3, p. 315-327.
- Richards, J.P. and Kerrich, R., 2007, Special paper: adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic geology*, v. 102, n. 4, p. 537-576.
- Richards, J.P., 2011, High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu±Mo±Au deposits: Just add water: *Economic Geology*, v. 106, no. 7, p. 1075-1081.
- Richards, J.P., 2022, Porphyry copper deposit formation in arcs: What are the odds?; *Geosphere*, v. 18, no. 1, p. 130-155.
- Richards, J.P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A., Fletcher, T., 2012, High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: Examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan: *Economic geology*, v. 107, no. 2, p. 295-332.
- Rizzotto, G.J., Alves, C.L., Rios, F.S., Barros, M.A.D.S.A., 2019, The Western amazonia igneous belt: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 96, 102326.
- Roverato, M., Giordano, D., Giovanardi, T., Juliani, C., Polo, L., 2019, The 2.0–1.88 Ga Paleoproterozoic evolution of the southern Amazonian Craton (Brazil): An interpretation inferred by lithofaciological, geochemical and geochronological data: *Gondwana Research*, v. 70, p. 1-24.
- Rohrlach, B. D.; Loucks, R. R.; Porter, T. M., 2005, Multi-million-year cyclic ramp-up of volatiles in a lower crustal magma reservoir trapped below the Tampakan copper-gold deposit by Mio-Pliocene crustal compression in the southern Philippines. *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective*, v. 2, p. 369-407.
- Ross, P.S., Bédard, J. H., 2009, Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 46, n. 11, p. 823-839.
- Santos J.O.S. 2003. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.) CPRM, p. 169-195.
- Santos, F.S, 2018, Petrologia das sucessões vulcânicas do Grupo Colíder na região entre Guarantã do Norte e a Serra do Cachimbo, Mato Grosso, Brasil. [Dissertação de mestrado]: Cuiabá, Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Geociências, 57p.
- Santos, J.O.S., Groves, D.I., Hartmann, L.A., Moura, M.A., McNaughton, N.J., 2001, Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta domains, Tapajós–Parima Orogenic Belt, Amazon Craton, Brazil: *Mineral Deposits*, v. 36, p. 278–299.
- Santos, J.O.S., Van Breemen, O.B., Groves, D.I., Hartmann, L.A., Almeida, M. E., McNaughton, N.J., Fletcher, I.R., 2004, Timing and evolution of multiple

- Paleoproterozoic magmatic arcs in the Tapajós Domain, Amazon Craton: constraints from SHRIMP and TIMS zircon, baddeleyite and titanite U–Pb geochronology: *Precambrian Research*, v. 131, no. 1-2, p. 73-109.
- Sun, S.S.; McDonough, W. F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: *Geological Society, London, Special Publications*, v. 42, n. 1, p. 313-345.
- Santos, J.O.S.D, Rizzotto, G. J., Chemale, F., Hartmann, L.A., Quadros, M. L., McNaughton, N.J., 2003, Three distinctive collisional orogenies in the Southwestern Amazon craton: constraints from U-Pb geochronology.
- Sato, K., Tassinari, C.C.G., 1997, Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico baseados em idade modelo Sm-Nd, calculada em evoluções de estágio único e estágio duplo. In: *Contribuições à Geologia da Amazônia*, Belém, p. 91-142.
- Senda, R., Kimura, J.I., Chang, Q., 2014, Evaluation of a rapid, effective sample digestion method for trace element analysis of granitoid samples containing acid-resistant minerals: Alkali fusion after acid digestion: *Geochemical Journal*, v. 48, no. 1, p. 99-103.
- Serrato, A.A.A., 2014, Geocronologia e evolução do sistema hidrotermal do depósito aurífero de Juruena, Província Aurífera de Alta Floresta (MT), Brasil. [Dissertação de Mestrado]: Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 66p.
- Sillitoe, R.H., 2010, Porphyry copper systems: *Economic Geology*, v. 105, no. 1, p. 3-41.
- Silva, A.S.M.D., 2020, Petrografia, geoquímica e geocronologia de rochas vulcano-plutônicas orosirianas do SE do Cráton Amazônico: um estudo da fronteira dos domínios Tapajós e Iriri-Xingu. [Dissertação de Mestrado]: Belém, Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 109p.
- Silva, M. G., Abram, M. B. (2008). Projeto metalogenia da Província Aurífera Juruena-Teles Pires, Mato Grosso. Goiânia: Serviço Geológico Brasileiro, CPRM.
- Tassinari, C.C., Macambira, M.J., 1999, Geochronological provinces of the Amazonian Craton: *Episodes Journal of International Geoscience*, v. 22, no. 3, p. 174-182.
- Tassinari, C.C.G., Macambira, M.J.B., 2004, A evolução tectônica do Cráton Amazônico. *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Editora Beca, São Paulo, p 471-485.
- Teixeira, W., Tassinari, C.C.G., Cordani, U.G., Kawashita, K., 1989, A review of the geochronology of the Amazonian Craton: Tectonic implications: *Precambrian Research*. v. 42, p. 213–227.
- Tokashiki, C.D.C., 2015, Mineralizações low-e intermediate sulfidation de ouro e de metais de base em domos de riolito paleoproterozóicos na porção sul da província mineral do Tapajós. [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 188p.
- Totland, M., Jarvis, I., Jarvis, K. E., 1992, An assessment of dissolution techniques for the analysis of geological samples by plasma spectrometry: *Chemical Geology*, v. 95, no. 1-2, p. 35-62.

- Trevisan, V.G., Hagemann, S.G., Loucks, R.R., Xavier, R.P., Motta, J.G., Parra-Avila, L. A., Assis, R.R., 2021, Tectonic switches recorded in a Paleoproterozoic accretionary orogen in the Alta Floresta Mineral Province, southern Amazonian Craton: *Precambrian Research*, v. 364, 106324.
- Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T., Silva C.G., Ricci P.F., Barbosa J.O., Klein E.L., Lopes E.S., Macambira E.B., Chaves C.L., Carvalho J.M., Oliveira J.G., Anjos G.C., Silva H.R. 2008a. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto Explicativo dos Mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Organizadores: M.L. Vasquez, L.T. Rosa-Costa. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.
- Vasquez, M.L., Cordani, U.G., Sato, K., Barbosa, J.D.P.D.O., Faraco, M.T.L., Maurer, V.C., 2019, U-Pb SHRIMP dating of basement rocks of the Iriri-Xingu domain, Central Amazonian province, Amazonian craton, Brazil: *Brazilian Journal of Geology*, v. 49, e20190067.
- Wang, T., Xiao, W., Collins, W.J., Tong, Y., Hou, Z., Huang, H., Han, B., 2023, Quantitative characterization of orogens through isotopic mapping: *Communications Earth & Environment*, v. 4, no. 1, p. 110.
- Whalen, J. B.; Currie, K. L.; Chappell, B. W., 1987, A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to mineralogy and petrology*, v. 95, p. 407-419.
- Wilkinson, J.J., 2013, Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs: *Nature Geoscience*, v. 6, no. 11, p. 917-925.
- Wu, C., Chen, H., Lu, Y., 2022, Crustal structure control on porphyry copper systems in accretionary orogens: insights from Nd isotopic mapping in the Central Asian Orogenic Belt: *Mineralium Deposita*, p. 1-11.
- Xavier, R.P., Monteiro, L.V.S., Moreto, C.P.N., Pestilho, A.L.S., Melo, G.H.C., Silva, M.A.D., Silva, F.H.F, 2012, The iron oxide copper-gold systems of the Carajás mineral province, Brazil.
- Zhao, G., Sun, M., Wilde, S.A., Li, S., 2004, A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: assembly, growth and breakup: *Earth-Science Reviews*, v. 67, no. 1-2, p. 91-123.
- Zivkovic, Z., Danyushevsky, L., Halley, S., Barker, S., Baker, M, 2023, Comparison of lithium borate fusion and four-acid digestions for the determination of whole-rock chemistry—implications for litho-geochemistry and mineral exploration: *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 23, no. 2.