



VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE **METALOGENIA**

17 A 20/8/2025 - SALVADOR - BA

ANÁLISE MORFOLOGICA DE GRÃOS DE OURO A PARTIR DA TÉCNICA DE MICROTOMOGRÁFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

Apresentação: Adriana Chatack Carmelo

Carmelo, A. C.¹; Prado, R. O.¹; Joko, T. C.²; Botelho, N. F.¹; Frazão Junior, M. L.²; Kazmirczak, C. C.¹

¹ Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, (chatack@unb.br)

² Instituto Nacional de Criminalística, Polícia Federal, Ministério da Justiça e Segurança Federal, Brasília, DF, Brasil





Introdução

- A microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT) apresenta-se como **técnica analítica não destrutiva e complementar aos estudos de rochas e minerais** obtidos por outras técnicas.
- A micro-CT possibilita a identificação da assembleia mineralógica a partir de **feições texturais e estruturais em contrastes de densidades relativas**, podendo fornecer informações relevantes de **ambientes de formação e ação de processos tardios**.



LPFR



Introdução

- Nesse contexto, a técnica disponibiliza produtos, em 2D (*imagens*) e 3D (**modelos tridimensionais**), em escalas micrométricas e submicrométricas, que permitem caracterizar detalhes **morfológicos** e **relações espaciais entre os minerais** (Reis Neto *et al.*, 2011; Cnudde *et al.*, 2012).
- Neste trabalho, optou-se analisar amostras de um granito silicificado e sericitizado (alteração potássica), mineralizado em **ouro**, oriundo da Província Mineral Tapajós (PMT), centro-sul do Cráton Amazônico, denominado **Prospecto Rosa de Maio** (Pinto *et al.*, 2019; Alves *et al.*, 2025).





Objetivos

- Analisar os **aspectos texturais do ouro livre e associado a sulfetos**, relacionando-os a possíveis fontes primárias **a partir da técnica de microtomografia computadorizada de raios X (micro-CT)**.





Metodologia

Micro-CT e Classificação do Ouro



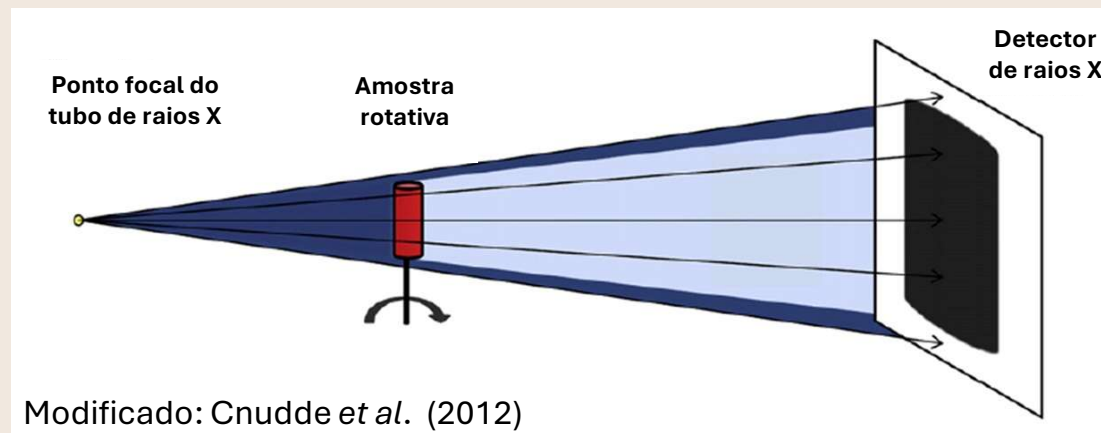


1) Microtomografia

- A microtomografia computadorizada de raios X apresenta-se segundo a lei de atenuação (Okuno & Yoshimura, 2010):

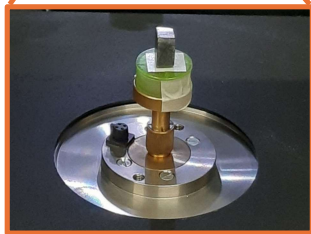
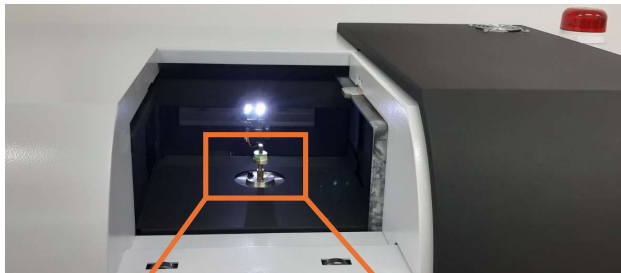
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

I : intensidade do feixe emergente; I_0 : intensidade do feixe incidente;
 x : espessura do objeto atenuador; μ : coeficiente de atenuação linear do objeto

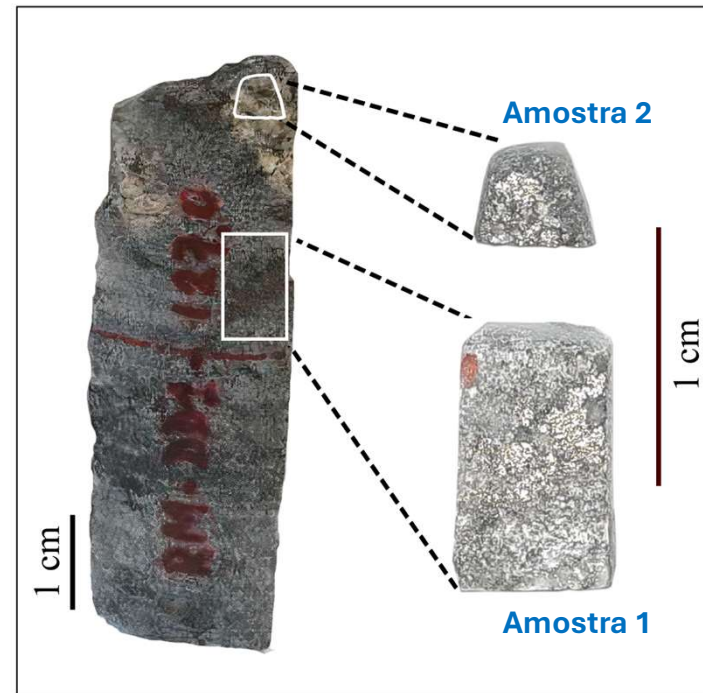


Materiais

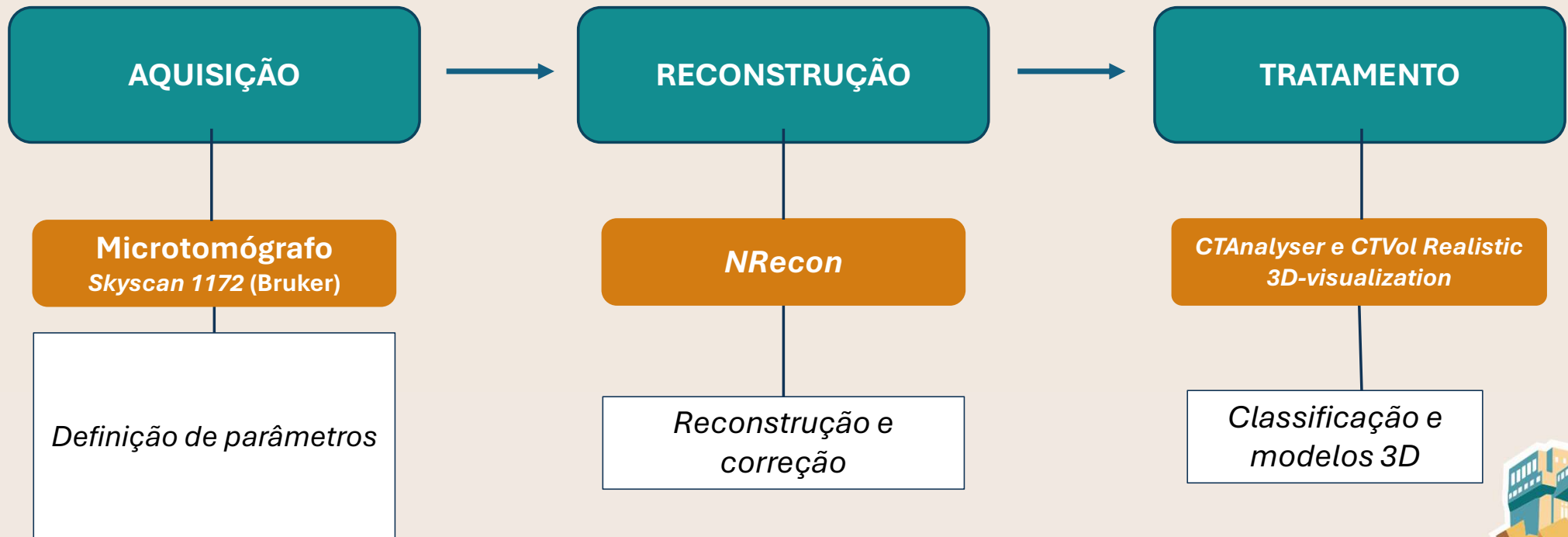
Microtomógrafo Skyscan 1172 (Bruker)



Amostras do granito mineralizado



Metodologia

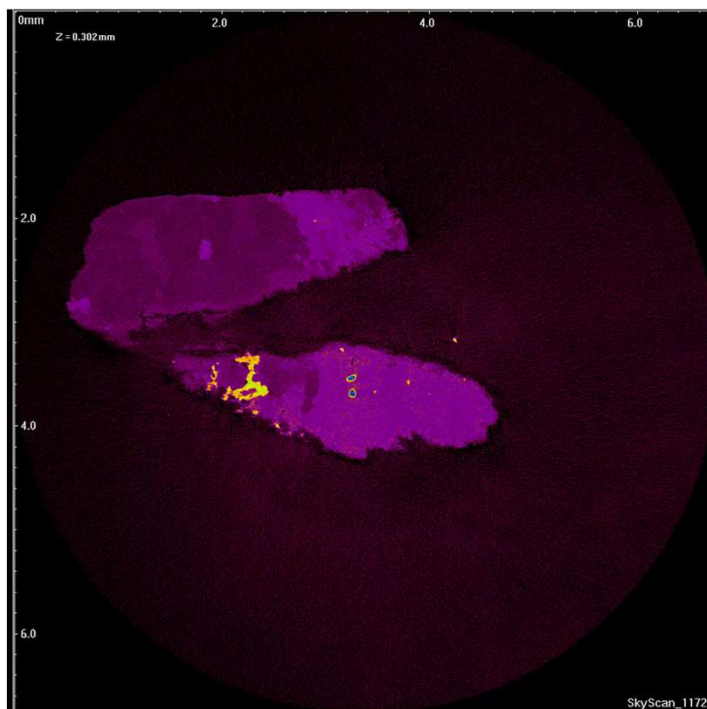


Fonte: Prado et al. (2024)

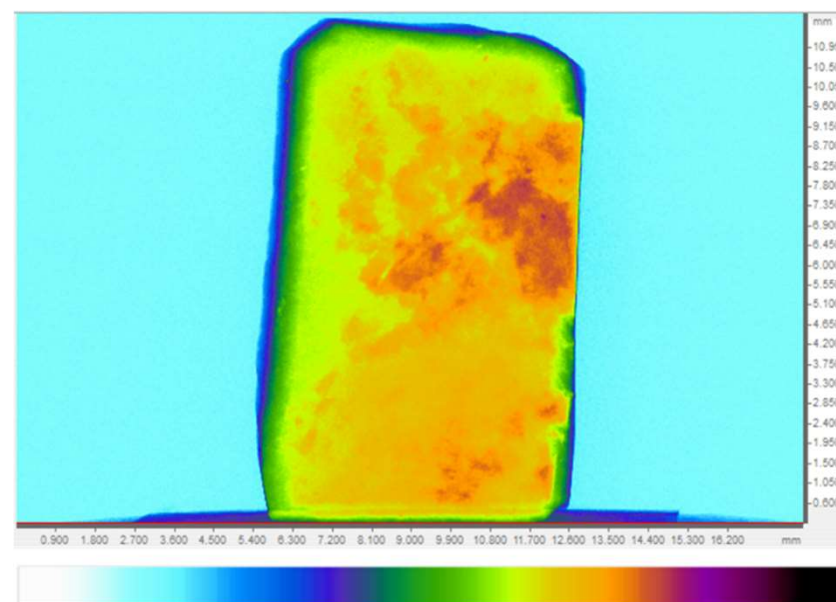




Tratamento: imagens microtomográficas (vídeo BD)



Amostra 1



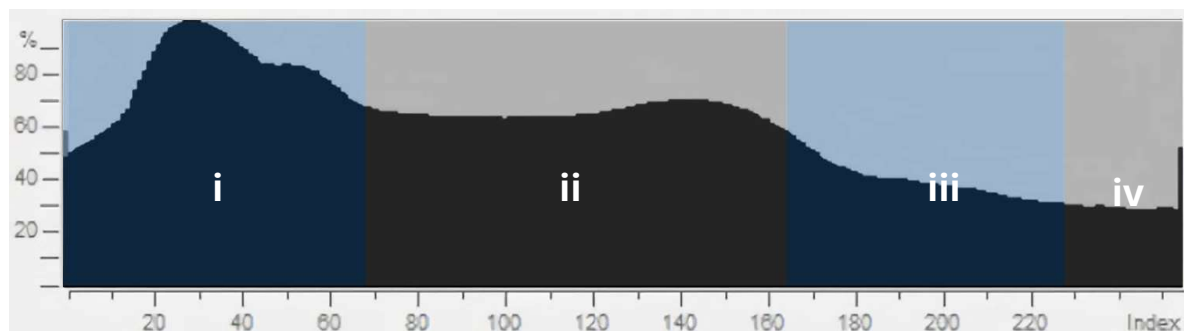
← + 3900 imagens

Fonte: Prado et al. (2024)





Tratamento: definição de classes

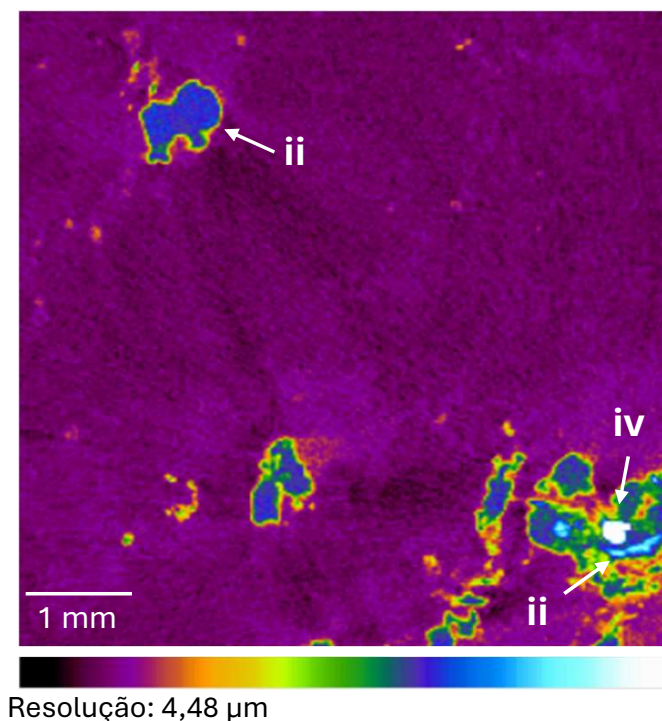


Classes de Atenuação

- i) Silicatos (ganga)
- ii) Goethita
- iii) Pirita
- iv) Ouro

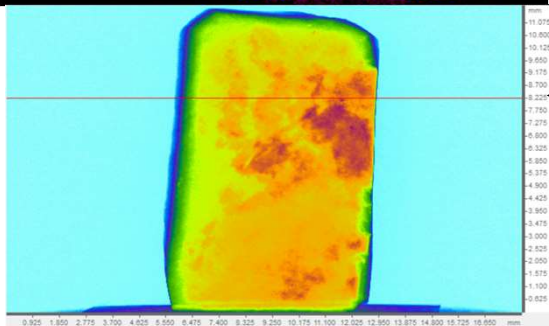
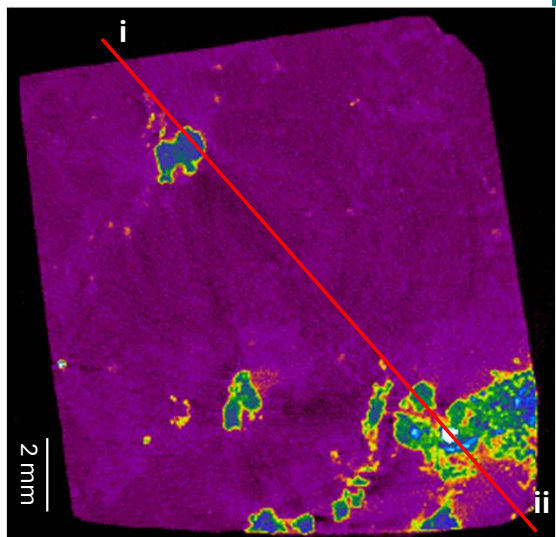
Fonte: Prado et al. (2024)

Amostra 1 (imagem nº 920)

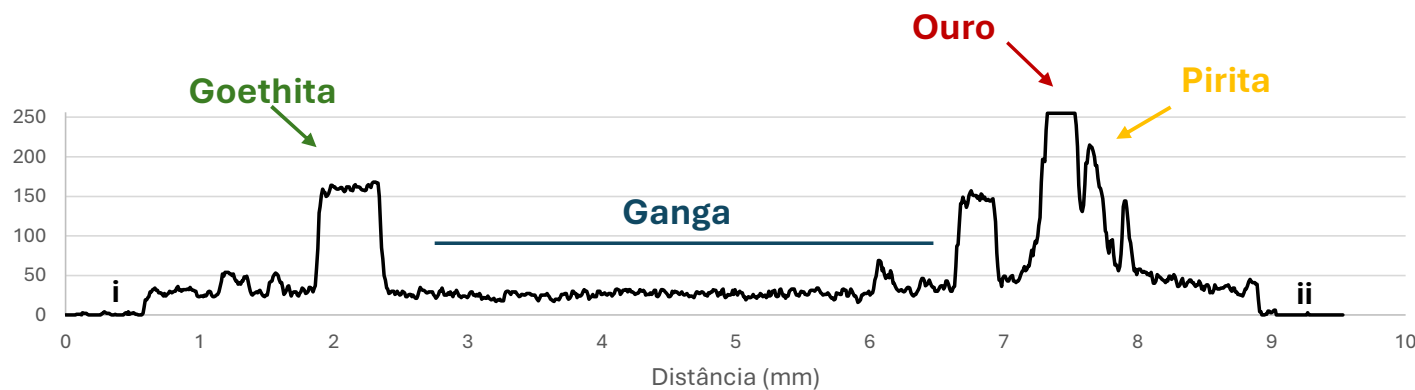




Tratamento: perfil de atenuação dos raios X



Amostra 1- Discriminar objetos para análise

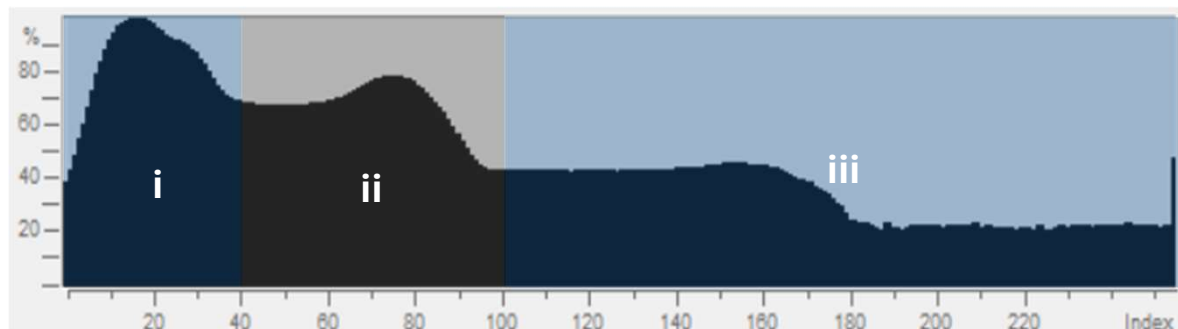


Fonte: Prado et al. (2024)





Tratamento: definição de classes



Classes de Atenuação

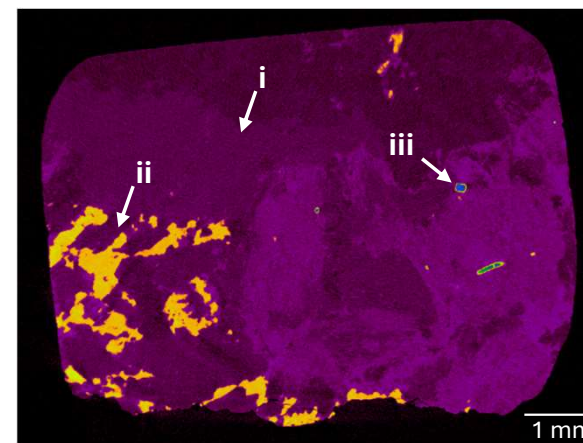
i) Silicatos (ganga)

ii) Pirita

iii) Ouro

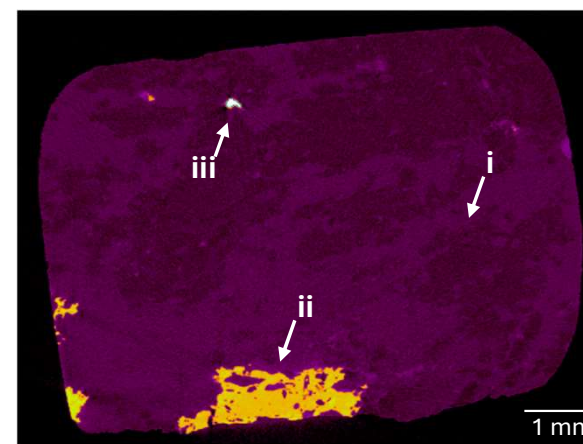
Resolução: 1,69 μm

Fonte: Prado et al. (2024)



Amostra 2

nº 315



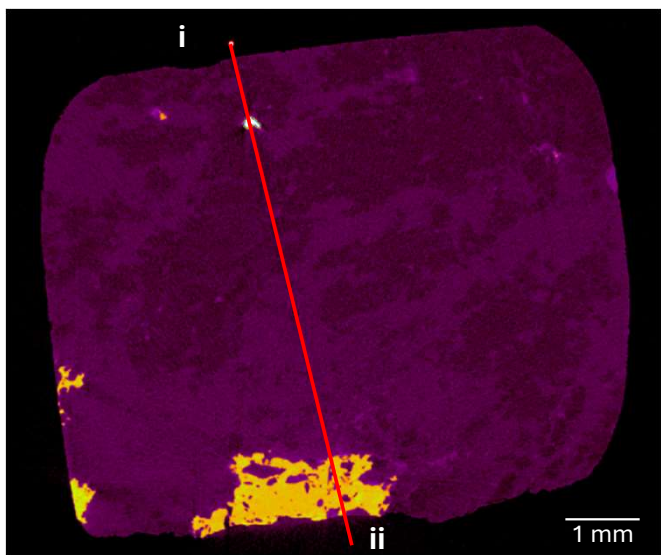
nº 813



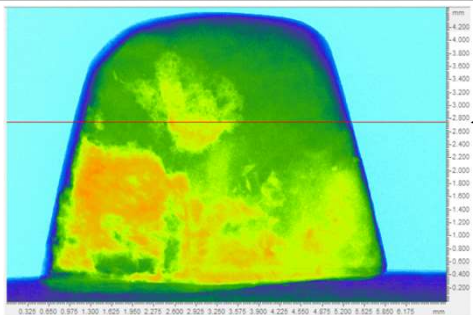
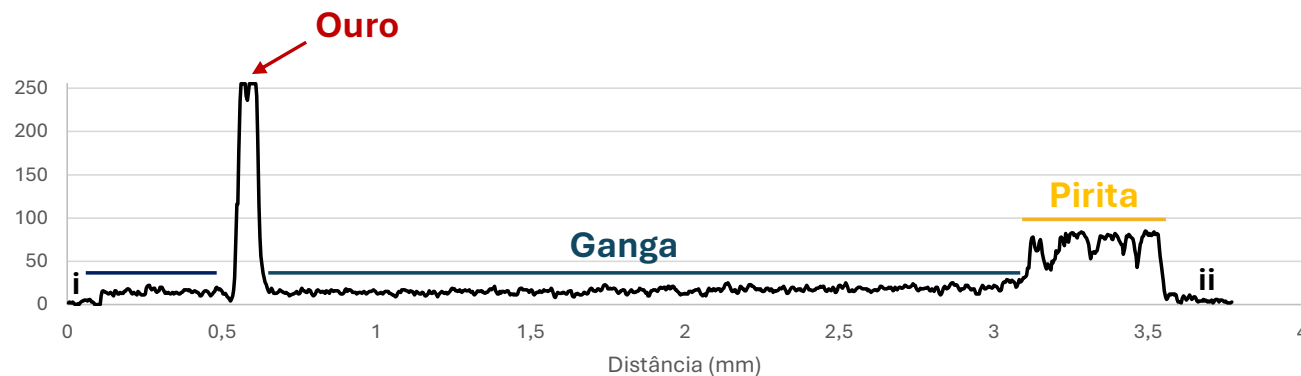
LPFR



Tratamento: perfil de atenuação dos raios X



Amostra 2- Discriminar objetos para análise



← imagem nº 813

Fonte: Prado et al. (2024)



2) Classificação do Ouro: exploração mineral

- Critérios de quantificação e análise da morfologia dos grãos de ouro, para **estimar distância de transporte da fonte à deposição** (Horbe *et al.*, 2019; Xavier-Masson *et al.*, 2020;).
- A quantificação precisa da morfométrica dos grãos (3D) é útil para avaliar seu **volume**, relaciona-la ao tamanho das partículas (Xavier-Masson *et al.*, 2020; Chisambi *et al.*, 2020).
- **Análise complementar aos protocolos analíticos 2D e 3D**, com melhor compreensão dos aspectos texturais que controlam a mineralização aurífera (Xavier-Masson *et al.*, 2020; Chisambi *et al.*, 2020).
- **Agregados de partículas de ouro**, diâmetro esférico 3 a 5 mm, **equivalem em minério ROM (minério bruto) > 10 mm para minério de alto teor** (Dominy *et al.*, 2021).



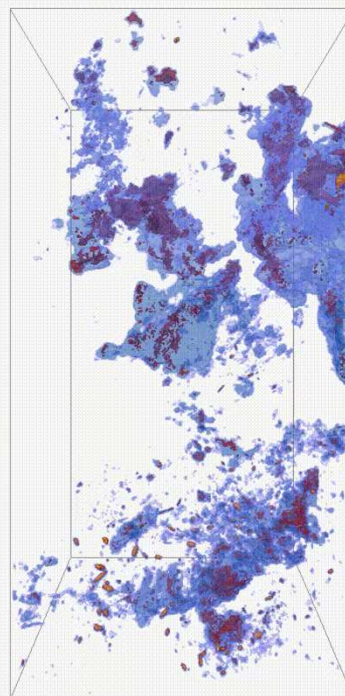
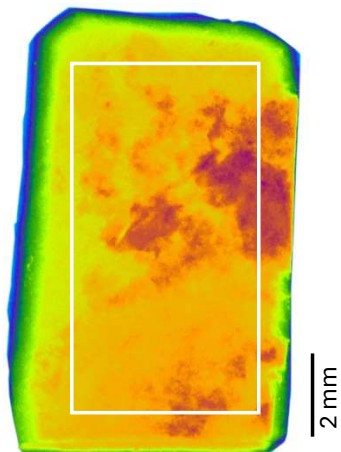


Resultados





Resultados : vídeo modelo 3D Amostra 1



LEGENDA

- Pirita
- Goethita
- Ouro

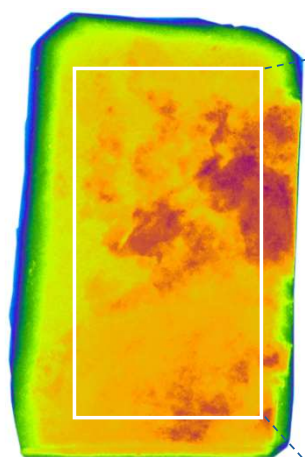
Fonte: Prado et al. (2024)





Resultados : modelo 3D Amostra 1

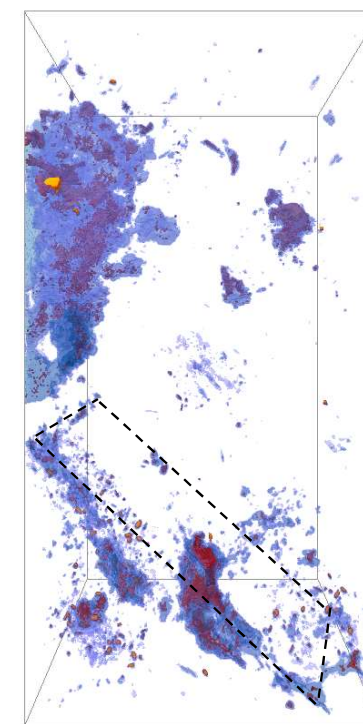
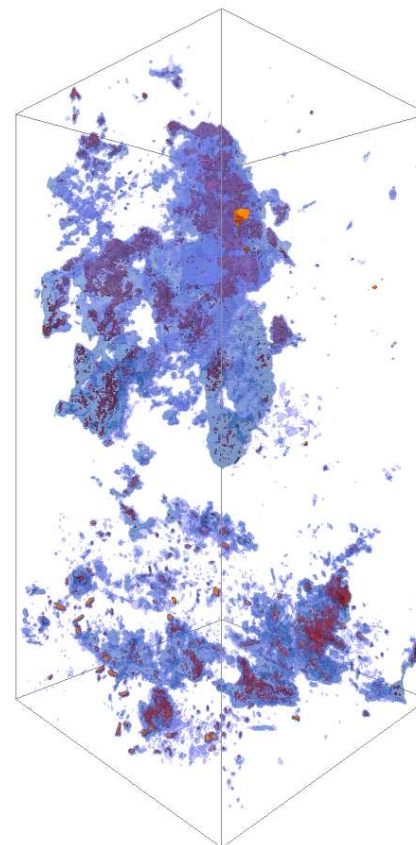
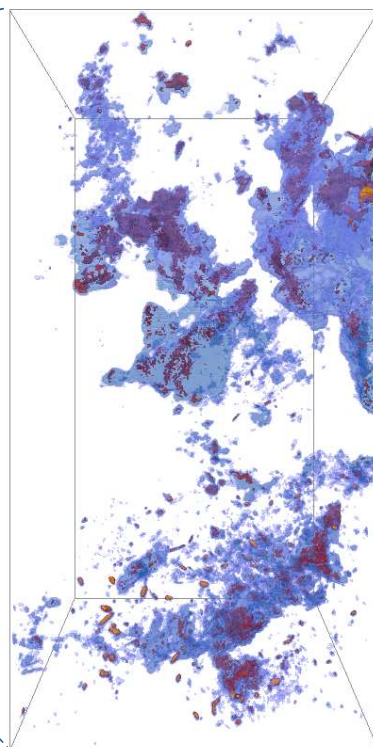
Fonte: Prado et al. (2024)



2 mm

Quantificações principais no volume selecionado

- Total de seções micro-CT: 1123
- Tamanho do *pixel*: 4,48 μm
- Volume total: 252,548 mm^3
- Volume de silicatos: 246,33 mm^3 (97,33%)
- Volume de goethita: 5,84 mm^3 (2,31%)
- Volume de pirita: 0,37 mm^3 (0,14%)
- Volume de ouro: 0,008 mm^3 (0,003%)



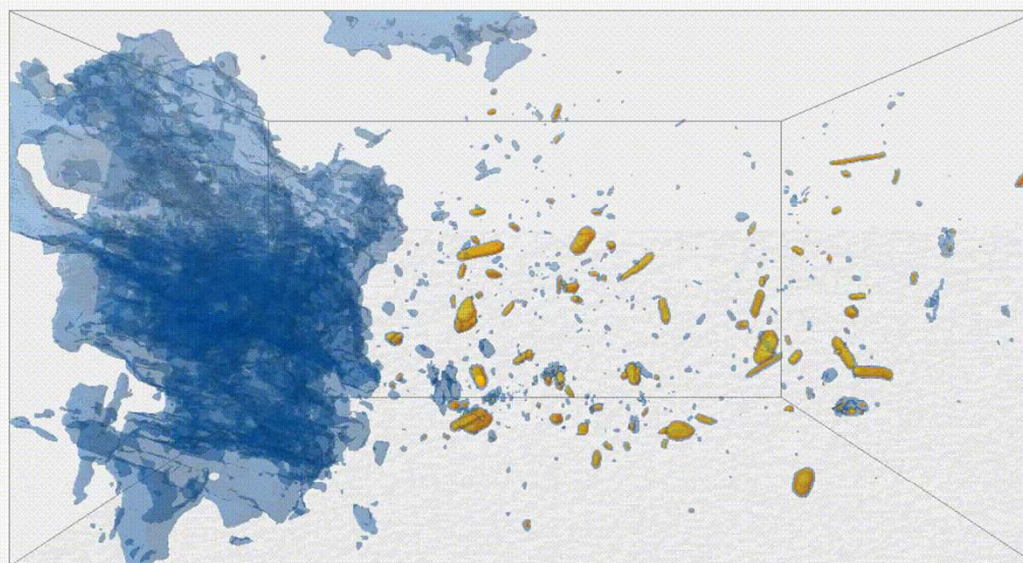
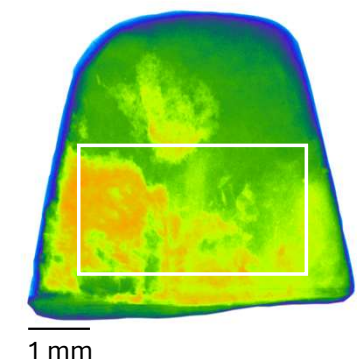
LEGENDA

- Pirita
- Goethita
- Ouro





Resultados : vídeo modelo 3D Amostra 2



LEGENDA

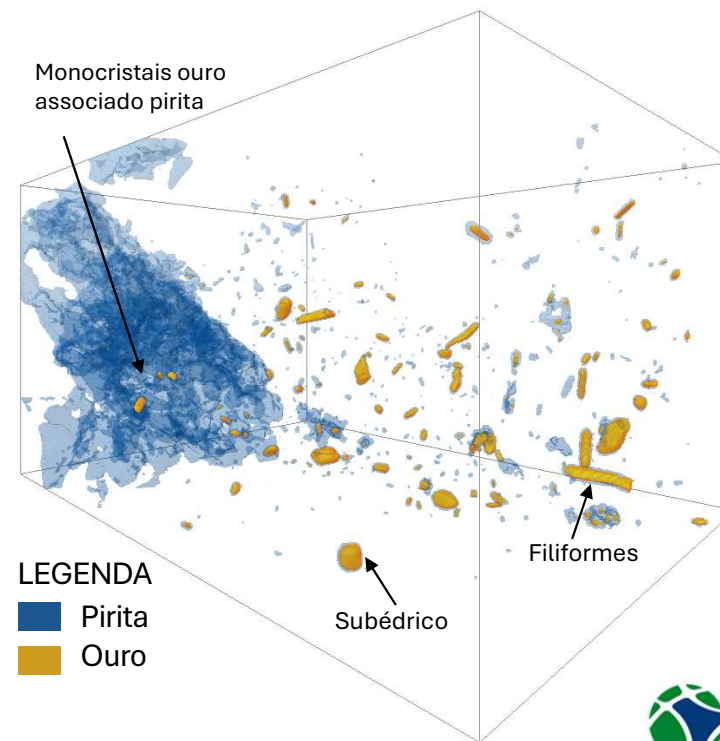
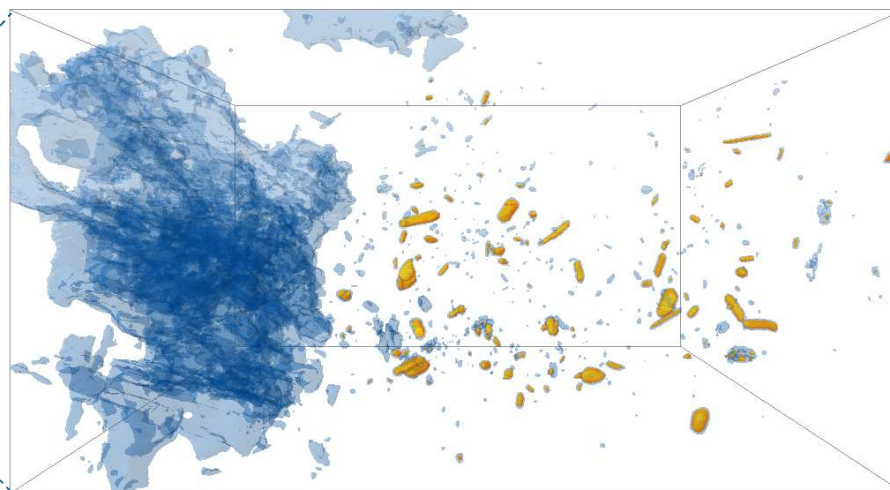
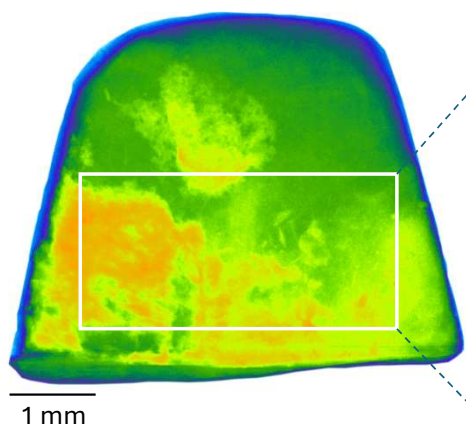
-  Pirita
-  Ouro

Fonte: Prado et al. (2024)





Resultados : modelo 3D Amostra 2



Quantificações principais no volume selecionado

- Total de seções micro-CT: 919
- Tamanho do *pixel*: 1,69 μ Sub
- Volume total: 23,41 mm^3
- Volume de silicatos: 21,36 mm^3 (91,21%)
- Volume de pirita: 2,04 mm^3 (8,74%)
- Volume de ouro: 0,0092 mm^3 (0,041%)

0,5 mm

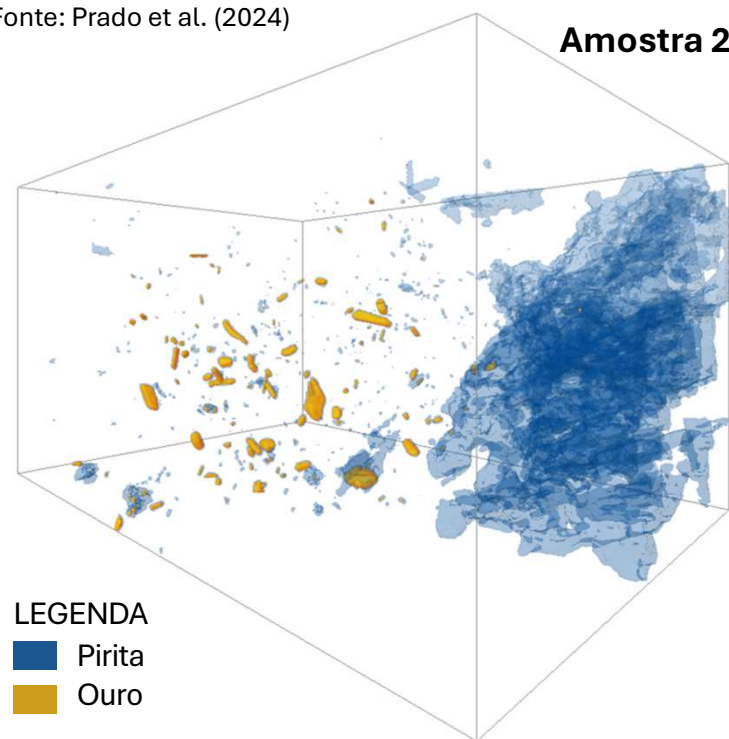
Fonte: Prado et al. (2024)



Resultados

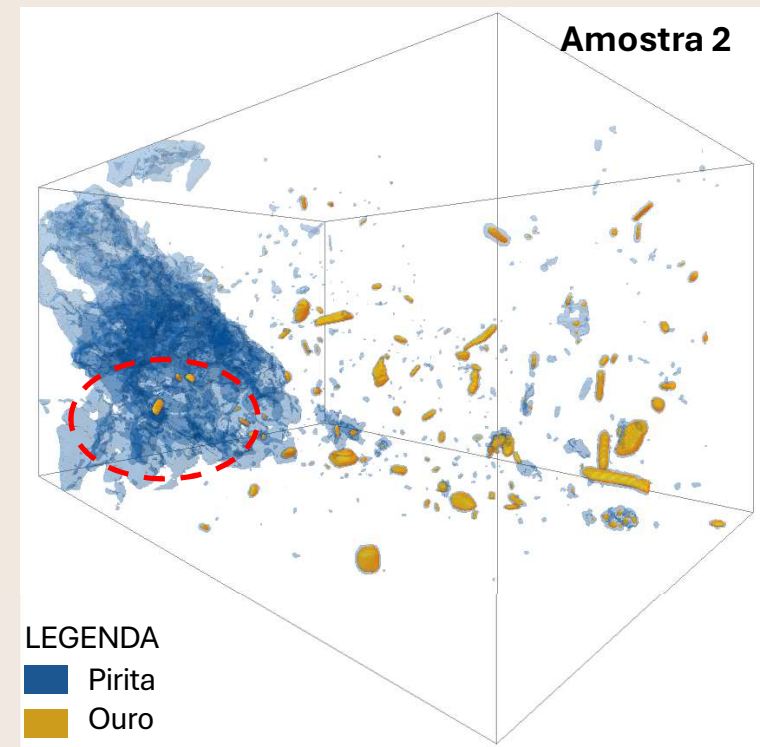
- As partículas ouro apresentam-se como grãos **milimétricos a submilimétricos subarredondados a arredondados, irregulares, alongados e formato poligonal** e com possíveis cavidades de corrosão.
- A **análise das imagens e dos modelos 3D** resultou na obtenção de informações relevantes sobre **os aspectos texturais e morfológicos** do ouro “hiperdensos com Unidades de Hounsfield (HU) - **coeficiente de atenuação de raios X**” compatíveis.

Fonte: Prado et al. (2024)



Resultados

- As feições morfológicas possibilitam separar a forma e teor do ouro em dois tipos:
 - Contido em sulfetos, ocorrendo como pequenas inclusões isoladas de monocristais euédrico, **com volume (teor) menor**.
 - Contido na ganga (Qz), o ouro está espalhado em diferentes formas, orientações e tamanhos, indicando crescimento livre em ambiente propício à formação de monocristais euédrico e policristais alongados (filiformes), **com volume de ouro (teor) significativamente maior**.



Fonte: Prado et al. (2024)





Conclusões

- As análises permitem o conhecimento efetivo da **distribuição do ouro por tipo de mineralização**, possibilitando desenvolver protocolos de amostragem que **minimizem “vieses”**, tais como os **decorrentes de efeitos pepitas**.
- **Estudos sobre a metalogenia do ouro** são bem consolidados, mas há **escassez de pesquisas sobre a cristalografia e as relações tridimensionais e estruturais do ouro primário**.
- A micro-CT **contribui nos estudos que quantificam o volume e o posicionamento** espacial dos grãos de ouro e, principalmente, podem ser relevantes na análise **final da cadeia mineral**.





Referências Bibliográficas

- Alves, P.V.F.S., Botelho, N.F., Souza, V.S., Cunha, L.M., Gonçalves, G., Coaquira, J. A.H., Cuadros, F.A.J., Yokoyama, E. (2025) Geochemistry, U-Pb Geochronology, and Sm-Nd Isotopes of the Granitic Rocks Associated with the Rosa de Maio Gold Deposit in the Tapajós Mineral Province, Brazil: Magmatic Evolution, Source Characterization, and Implications for Magma Fertility. *Precambrian Research* 427 (2025)107883.
- Cnudde, V.; Dewanckele, J.; De Boever, W.; Brabant, L.; De Kock, T. (2012) 3D characterization of grain size distributions in sandstone by means of X-ray computed tomography. *Quantitative mineralogy and microanalysis of sediments and sedimentary rocks*, v. 42, p. 99-113.
- Chisambi, J., Heyden, B., Tshibalanganda, M., Le Roux, S. (2020) Gold Exploration in Two and Three Dimensions: Improved and Correlative Insights from Microscopy and X-Ray Computed Tomography. *Minerals* 2020, 10, 476.
- Dominy, S.C., Platten, I.M., Glass, H.J., Purevgerel, S.; Cuffley, B.W. (2021) Determination of Gold Particle Characteristics for Sampling Protocol Optimisation. *Minerals* 2021, 11, 1109.
- Horbe, A.M.C., Martins-Ferreira, M.A.C., Lima, R.S. 2019. Supergene gold characterization by geochemistry, grain morphology and Au-Ag-Cu-Te classification. *Journal of South American Earth Sciences* 95 (2019) 102315.
- Okuno, E., Yoshimura, E. (2010) Capítulo 2: Raios X. *In: Física das radiações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Pinto, M., Botelho, N.F.; Clerot, L.C., Cunha, L.M., Carrino, T.A., Corrêa, P.M. (2019) Geologia e Geoquímica dos Prospectos Auríferos Doze de Outubro, Rosa de Maio, Bandeirante e Maués, Província Mineral do Tapajós, Amazonas. *In: Anais do 16º Simpósio de Geologia da Amazônia*, Manaus, AM.
- Prado, R.O.; Carmelo, A.C.; Bernardes, R.B., Botelho, N.F.; Carvalhêdo, A.L.C. (2024) Análise textural de um granito mineralizado a partir da técnica de microtomografia computadorizada de raios X. *In: Anais do 51º Congresso Brasileiro de Geologia*, Belo Horizonte, MG.
- Reis Neto, J.M.D.; Fiori, A.P.; Lopes, A.P.; Marchese, C.; Pinto-Coelho, C.V.; Vasconcellos, E.M.G.; Silva, G.F.; Secchi, R. (2011) A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, p. 498-508, 2011.
- Xavier-Masson, F., Beaudoin, G., Laurendeau, D. (2020) Quantification of the Morphology of Gold Grains in 3D Using X-Ray Microscopy and SEM Photogrammetry. *Journal of Sedimentary Research*, 2020, v. 90, 286–296.





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MJSP - POLÍCIA FEDERAL

Obrigada!

- **Contato:**
chatack@unb.br
lpfr.igd@unb.br
- **Site:**
lpfr.igd.unb.br