Gestão:

Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

MODELAGEM MINERALÓGICA TRIDIMENSIONAL DE ROCHAS CARBONÁTICAS INTEGRANDO HSI (SWIR), µXRF E µCT

Gondek, T. P.[1]; Souza Filho, C. R.[2];
[1] Bolsista de Mestrado do PRH-ANP 19/UNICAMP, Programa de Pós-Graduação DGRN, Campinas – SP E-mail: t206156@dac.unicamp.br [2] Docente do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas , Campinas – SP. E-mail: beto@ige.unicamp.br

1 Motivação

Reservatórios carbonáticos:

- Elevada heterogeneidade
  → **Dificulta a caracterização e a modelagem.**

Caracterização mineralógica convencional:

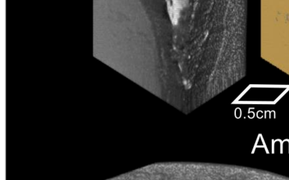
- **µCT:** fornece informações 3D da estrutura interna
  → **Limitações na distinção de minerais.**
- **Métodos complementares:** informações mineralógicas são frequentemente obtidas por técnicas destrutivas.

Demanda: classificar a distribuição mineralógica em 3D de forma não destrutiva.

2 Solução Proposta

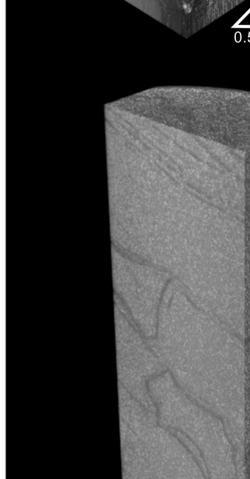
Integração µCT + µXRF + HSI:

- Combinar informações estruturais, químicas e **hiperespectrais**.
- Geração de modelos mineralógicos 3D não destrutivos de rochas carbonáticas.
- Uso de **inteligência artificial** para automatizar a identificação das fases minerais.



Integração multissensorial: caracterização sobre a composição e a distribuição das fases minerais preservando as amostras

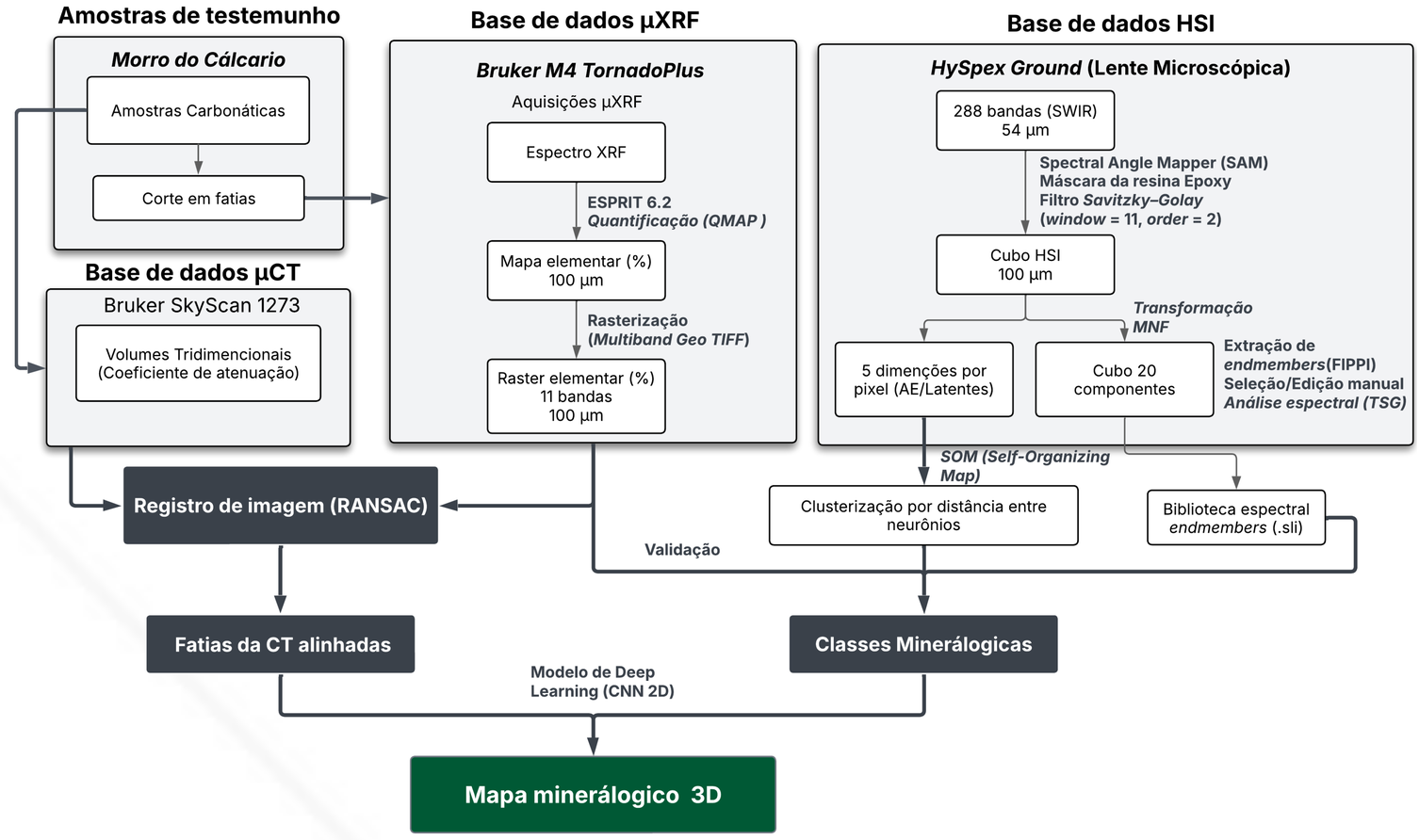
3 Local de estudo



Amostras utilizadas para validação da metodologia:

- Faixa Vazante–Paracatu (MG);
- Formação Morro do Calcário (Grupo Vazante);
- Depósitos carbonáticos dolomíticos.

4 Metodologia



5 Resultados e Discussões

- **Integração HSI–µXRF:** correspondência espacial entre os domínios mineralógicos identificados por SWIR e as variações de Ca, Fe, Si, Al e K nos mapas QMAP.
  - **Clusterização:** AE + SOM + agrupamento hierárquico apresentou o melhor desempenho (Silhouette = 0,328; DBI = 1,046).

Distinção dos principais domínios mineralógicos.

- A correspondência entre assinaturas espectrais e composição química **permitiu validar os clusters e identificar 12 classes mineralógicas**, incluindo variações de Fe na dolomita e associações com fengita e caulinita.

Caracterização 3D:

- As classes mineralógicas apresentaram diferenças no coeficiente de atenuação, evidenciando seu potencial para a discriminação das fases nos volumes de µCT

CNN 2D preliminar:

- A classificação das classes mais diferenciáveis (dolomita, quartzo e óxido de ferro) alcançou **acurácia de 0,74 e F1-Score de 0,73**, como etapa inicial para a classificação em volumes de µCT.
- Predição bem-sucedida na amostra de teste, indicando **capacidade de generalização e perspectivas para a evolução do modelo.**

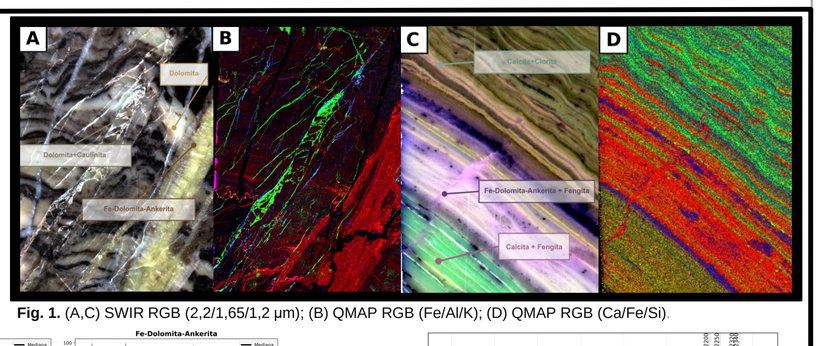


Fig. 1. (A,C) SWIR RGB (2,2/1,65/1,2 µm); (B) QMAP RGB (Fe/Al/K); (D) QMAP RGB (Ca/Fe/Si).

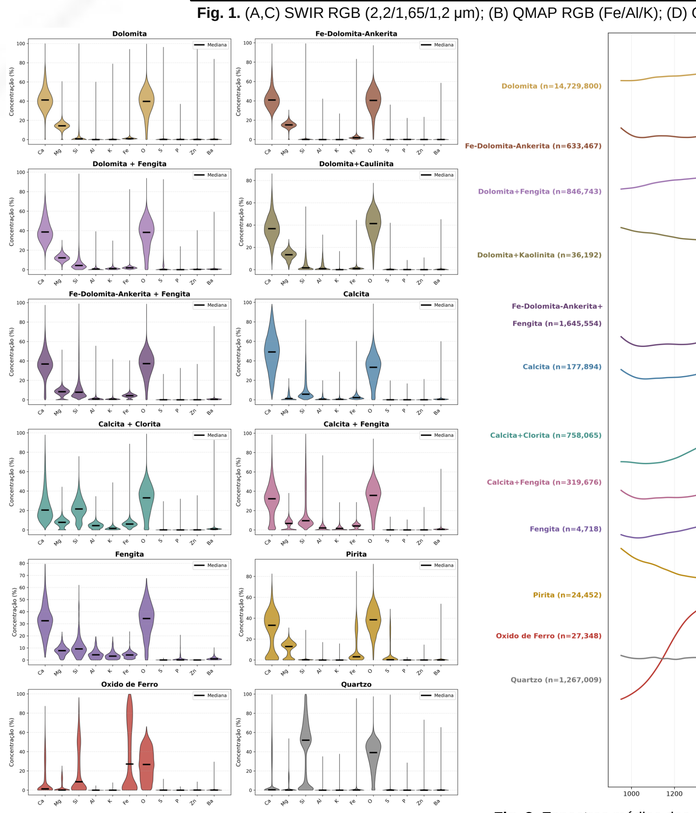


Fig. 2. Distribuição das concentrações elementares das classes mineralógicas obtidas por QMAP.

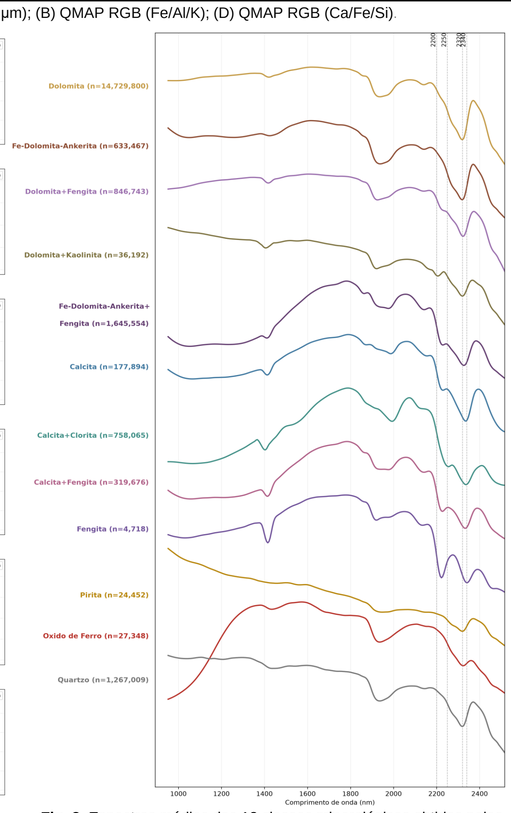


Fig. 3. Espectros médios das 12 classes mineralógicas obtidas pelos agrupamentos AE + SOM, com reflectância normalizada e offset vertical.

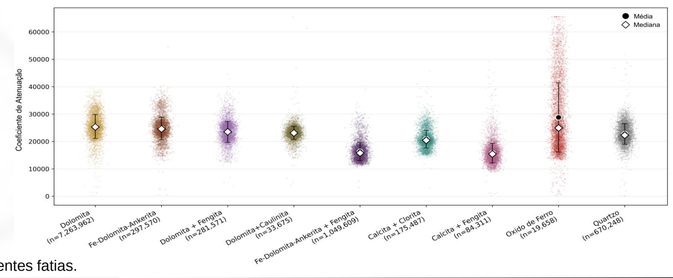


Fig. 4. Distribuição do coeficiente de atenuação nas classes mineralógicas, com indicação da média e mediana

Fig. 5. Predição preliminar nos volumes de treinamento e teste por CNN 2D

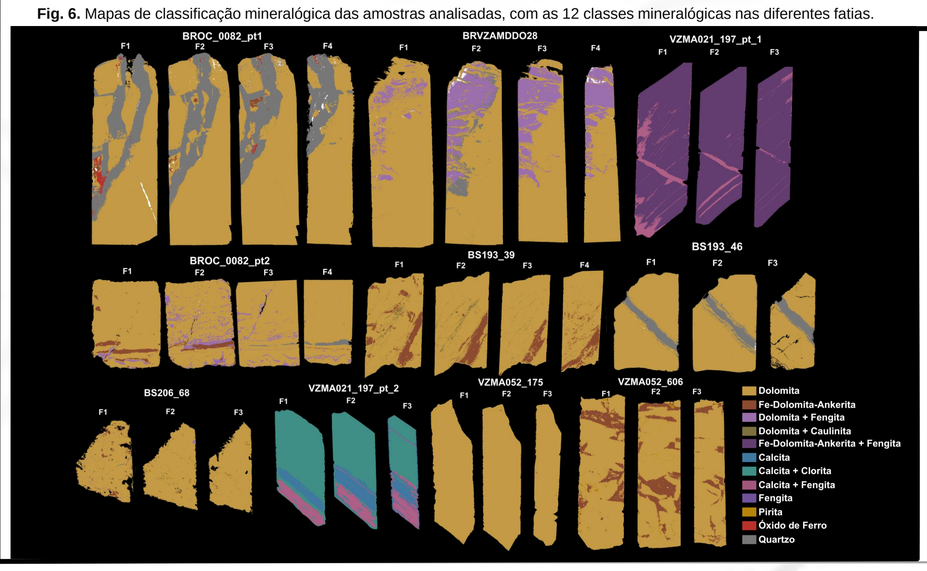


Fig. 6. Mapas de classificação mineralógica das amostras analisadas, com as 12 classes mineralógicas nas diferentes fatias.

6 Conclusões

- **Metodologia generalizável, reprodutível e não destrutiva** para a caracterização mineralógica tridimensional de testemunhos carbonáticos.
- **Conecta a escala do testemunho à do reservatório**, apoiando a avaliação, o desenvolvimento e a gestão de reservatórios.

Agradecimentos

PETROBRAS
prh anp 19/UNICAMP
UNICAMP