

## Resultados preliminares de espectroscopia de reflectância e imageamento hiperespectral na região da mina de scheelita de Brejuí (RN), Faixa Seridó, Província Borborema

Manoel Augusto Corrêa da Costa <sup>1,2</sup>  
Mônica Mazzini Perrotta <sup>2</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/IG  
R. João Pandiá Calógeras, 51 - 13083-870 - Campinas - SP, Brasil  
{manoelcosta, beto}@ige.unicamp.br

<sup>2</sup> Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM  
R. Costa, 55 - 01304-010 – São Paulo - SP, Brasil  
{manoel.costa, monica.perrotta}@cprm.gov.br

**Abstract.** The Seridó mobile belt in the Borborema Province, northeastern Brazil, hosts a wealth of metallic occurrences, including the Brejuí W-Mo skarn deposit. Here we present preliminary results on reflectance spectroscopy and hyperspectral remote sensing applied to mineral mapping of host rocks and alteration zones in this classic skarn. Visible and infrared (VNIR-SWIR; 0.4-2,5  $\mu\text{m}$ ) lab spectroscopy was conducted using the ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution spectrometer. Contact spectral measurements allowed the identification of hornblende, chlorite (Mg-rich types), epidote, calcite, gypsum, phengitic illite and nontronite in the alteration zones, which correspond to retrograde hydrothermal assemblages associated to the W-Mo ore bodies. Actinolite, calcite, Fe/Mg-biotite, montmorillonite and kaolinite were depicted in the host rocks (schists, marbles, calc-silicate gneisses and pegmatites). Actinolite in calc-silicate gneisses suggests a more pervasive alteration mineral phase. Nontronite and phengitic illite are key minerals that characterize the hydrothermal system. The dominant presence of Mg-chlorite (FeOH = 2,249  $\mu\text{m}$ ) in the alteration zones is distinct from the Fe/Mg-biotite (FeOH = 2,253  $\mu\text{m}$ ) found in the host rocks (schists). Additionally, the increase in the CO<sub>3</sub> feature depth is also typical of these alteration zones (hydrothermal calcites). The Brejuí deposit was also remotely sensed by the ProSpecTIR-VS airborne hyperspectral imager, with 357 bands between the VNIR-SWIR range, at 2m spatial resolution. The data was processed by a stepwise approach including Minimum Noise Fraction (MNF), Pixel Purity Index (PPI) and Spectral Angle Mapper (SAM) methods. The classification map yielded from these procedures allowed mapping of marbles and calcsilicate rocks spatially close to the skarn mineralization.

**Palavras-chave:** spectral analysis, image processing, ProSpecTIR-VS sensor, skarn deposit, análise espectral, processamento de imagens, sensor ProSpecTIR-VS, depósito escarnítico.

### 1. Introdução

Situada na porção norte-nordeste da Província Borborema, a Faixa Seridó é historicamente conhecida pelas suas ocorrências de tungstênio e ouro, além de molibdênio, nióbio, tântalo, lítio, berílio e estanho. Nesta faixa, depósitos do tipo escarnitos foram descobertos na década de 1940, e desde então tem sido explorados economicamente (e.g., Oliveira, 1942; Jonhston Jr. & Vasconcelos, 1945; Salim, 1979 e 1993; Legrand *et al.*, 1993), com enfoque principal na extração de W-Mo e Au.

As variações químico-mineralógicas causadas por processos hidrotermais podem ser percebidas por meio da Espectroscopia de Reflectância (ER). A ER vem sendo comumente utilizada na prospecção mineral, por ser sensível às pequenas alterações na composição química e/ou na estrutura de um material que, frequentemente, vão resultar em deslocamentos na posição e na forma das feições de absorção espectral da radiação refletida (Clark 1999). As zonas de alteração hidrotermal associadas aos depósitos minerais também são comumente utilizadas em Sensoriamento Remoto para a exploração mineral (Sabine, 1999). As características fisiográficas da região Nordeste do Brasil (semi-árido do país) são favoráveis para a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto multi- e hiperespectral (Silva, 2009).

Imagens hiperespectrais possibilitam identificar as distribuições espaciais das fases minerais e permitem o mapeamento espectro-mineralógico da superfície do terreno.

No ano de 2015, o Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM iniciou o Projeto ARIM Seridó (Áreas de Relevante Interesse Mineral), que tem como principal objetivo estabelecer um modelo tectono-metalogenético para as mineralizações de tungstênio e ouro da Faixa Seridó (Cavalcante *et al.*, 2015). Com intuito de fornecer informações adicionais acerca da distribuição espacial das assembleias minerais associadas às mineralizações, cinco áreas foram imageadas por levantamento hiperespectral (minas de Brejuí W-Mo, Bodó W-Mo, Bonfim W-Mo-Au, Roça W-Mo e São Francisco Au) (Figura 1). Nesse contexto, este trabalho compreende os primeiros resultados a cerca da Espectroscopia de Reflectância e de Imageamento Hiperespectral sobre o depósito escarnítico da Mina de Brejuí, a sul do município de Currais Novos (RN).

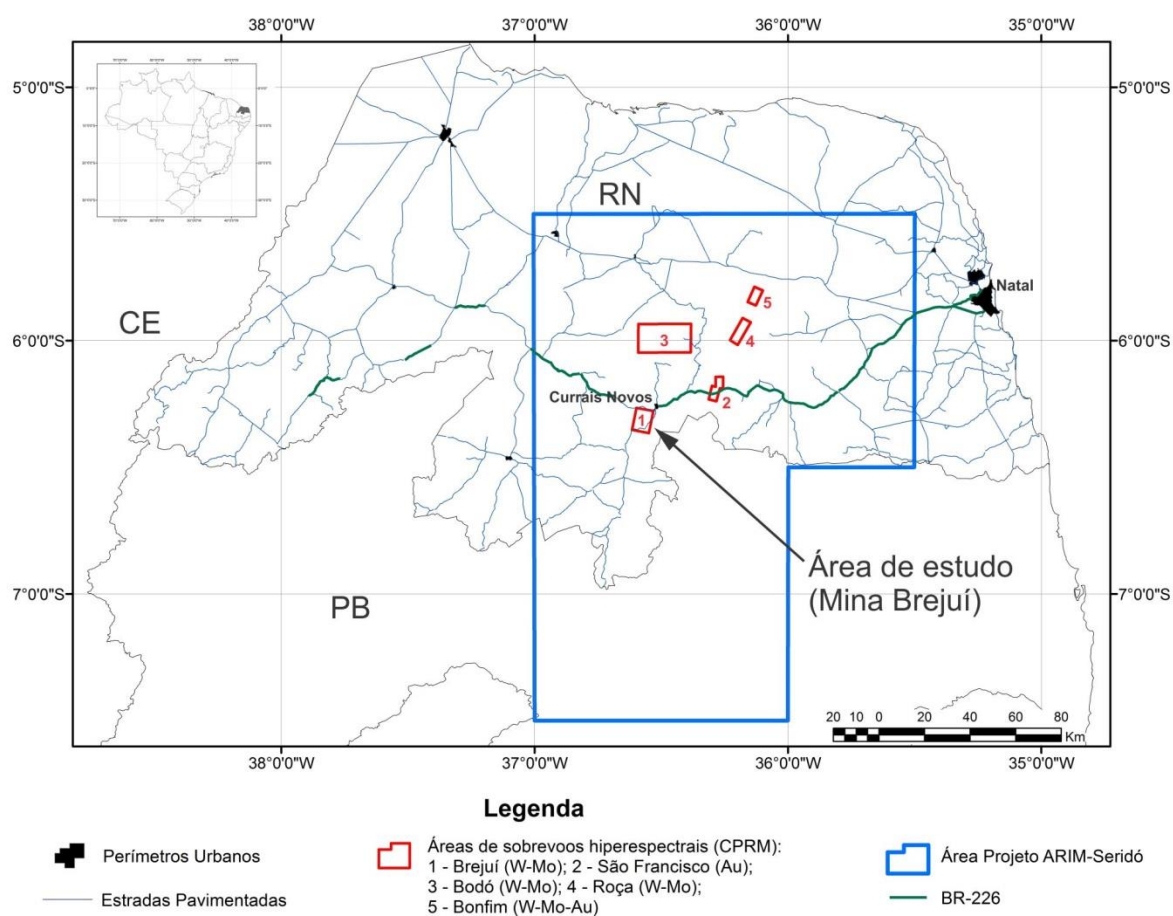


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

### 1.1 Geologia Regional e contexto da mineralização

A Faixa Seridó está inserida no contexto geotectônico da Província Borborema (Almeida *et al.*, 1977), na porção leste do Domínio Rio Piranhas-Seridó. A sequência de rochas supracrustais que recobre o embasamento arqueano/paleoproterozoico da Faixa Seridó foi denominada de Grupo Seridó, de idade neoproterozoica, e inclui xistos, quartzitos, gnaisses, anfibolitos, mármore, calcissilicáticas e formações ferríferas, intrudidas por granitoides brasileiros. As mineralizações de Au e W da Faixa Seridó encontram-se, quase que em sua totalidade, nas proximidades de intrusões graníticas neoproterozóicas (Figura 2).

A mineralização de scheelita hospeda-se em rochas calcissilicáticas e ocorre notadamente na Formação Jucurutu (Grupo Seridó) e no Complexo Caicó. Oliveira (1942), Jonhston Jr. & Vasconcelos (1945), apud Salim (1993), interpretaram as rochas calcissilicáticas, portadoras de scheelita, como escarnitos formados por metamorfismo de contato das intrusões ígneas brasileiras nos mármores. Em linhas gerais, os escarnitos de Brejuí são constituídos por minerais de duas paragêneses diferentes (Neto *et al.*, 2008):

- alta temperatura (escarnitos primários ou progradacionais): piroxênio (hedenbergita), anfibólio (hornblenda, magnésio-hornblenda, tremolita), granada (andradita), wollastonita, plagioclásio;
- baixa temperatura (escarnitos retrogradacionais): anfibólio (magnésio-hornblenda, tremolita, actinolita), vesuvianita, rodocrosita, flogopita, epidoto, clinozoisita, sericita, cloritas, fluorita, zeólitas (chabazita), opala, sulfetos.

## 2. Materiais e Métodos

No âmbito da Espectroscopia de Reflectância, foram coletadas 6 amostras no interior da mina subterrânea de Brejuí (MM-50A-F), que correspondem aos hidrotermalitos associados à mineralização de W-Mo, bem como os saprólitos relacionados a esta alteração hidrotermal em superfície (4 amostras, MC-09A-D). Adicionalmente, foram coletadas 3 amostras das principais rochas encaixantes, associadas à mineralização: mármores (MC-11), xistos (MC-07) e pegmatitos (MC-08), totalizando 13 amostras (Figura 2). As análises espectrais foram realizadas com o espectrorradiômetro *ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution*, com alcance espectral do visível ao infravermelho de ondas curtas, no intervalo de 350 a 2500 nm e resolução espectral de 3 nm (em 700 nm), 8,5 nm (em 1400 nm) e 6,5 nm (em 2500 nm), num total de 2151 bandas. A interpretação mineralógica das assinaturas espectrais foi feita por meio dos programas ENVI© 5.3 e *The Spectral Geologist©* (TSG). Foram utilizadas as bibliotecas espectrais de referência fornecidas pelo USGS (*United States Geological Survey*) (Clark *et al.*, 1993), e pela AUSSPEC *International (Spectral Analysis Guides for Mineral Exploration)*, bem como a ferramenta de operações entre espectros do programa ENVI©.

A área de estudo foi imageada pelo sensor hiperespectral ProSpecTIR-VS / AISA-Instruments da SpecTIR / FotoTerra. O sensor trabalha com dois subsistemas de imageamento: o Eagle, na região do visível / infravermelho próximo (VIS / NIR; 350 a 970 nm), e o Hawk, na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR; 970 a 2450 nm). O sensor possui um total de 357 bandas espectrais, com larguras de 4,6 nm (de 350 a 970 nm; 125 bandas) e 5,3 nm (de 970 a 2450 nm; 232 bandas). A resolução radiométrica dos dados é de 16 bits e a resolução espacial dos pixels, de 2 metros. Os dados foram obtidos no período entre Outubro de 2013 e Janeiro de 2014, e também entre Maio e Junho de 2014. A área do levantamento é de aproximadamente 79 km<sup>2</sup>, que corresponde a 19 faixas de sobrevoo, com cerca de 700 m de largura e recobrimento de 50%. Os dados foram entregues pelo fornecedor das imagens (Fototerra - SpecTIR), em unidades de reflectância aparente calculada pela conversão dos dados de radiância, num modelo de transferência radiativa (MODTRAN4), para compensação do efeito atmosférico, bem como com polimento da reflectância via algoritmo/filtro *Savitsky-Golay*. O geoposicionamento das faixas foi feito conforme arquivos GLT que trazem as informações para posicionamento geográfico das linhas de voo.

A classificação espectral foi feita por meio do assistente semiautomático de classificação do Programa ENVI (*Spectral Hourglass Wizard*), cujos parâmetros de classificação são indicados pelo especialista. A classificação segue a sequência: - Transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF); - mapeamento do Índice de Pureza dos Pixels; - definição dos Membros Finais (*Endmembers*); - classificação espectral baseada nos *endmembers* pelo método *Spectral Angle Mapper* (SAM) (Kruse *et al.* 1993).

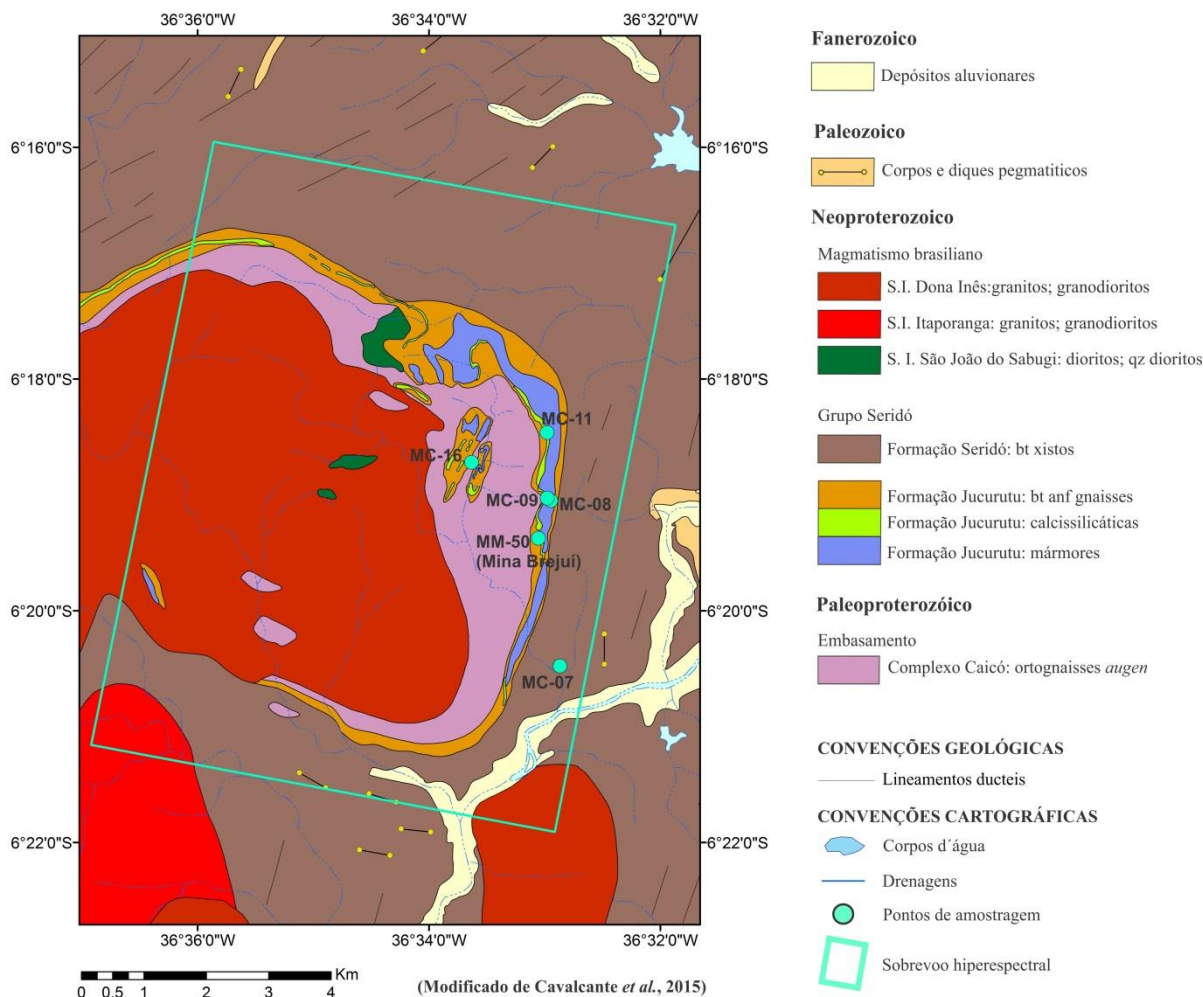


Figura 2. Mapa geológico simplificado da área de estudo, com localização dos pontos de amostragem.

### 3. Resultados e Discussão

A Espectroscopia de Reflectância permitiu a identificação dos principais minerais de alteração hidrotermal, relacionados principalmente à paragênese retrogradacional: clorita, epidoto, calcita, actinolita/hornblenda, illita (sericita) de composição fengítica (Fe/Mg), Fe-esmectita (nontronita), além do gipso, mineral ainda pouco descrito nestes depósitos, e associado a sulfetos. Segundo Silva *et al.* (2014), os escarnitos retrogradacionais hospedam os depósitos mais expressivos de scheelita. A Figura 3a sintetiza as principais feições de absorção diagnósticas dos minerais identificados nos hidrotermalitos, bem como suas posições de comprimento de onda distintas em relação às rochas encaixantes. No âmbito das rochas encaixantes, os principais minerais identificados foram calcita e actinolita (mármore, calcissilicáticas / mármores hidrotermalizados?), biotita e esmectita aluminosa / montmorilonita (xistos e pegmatitos), além de caulinita (pegmatito).

A calcita recristalizada nos hidrotermalitos possui uma granulometria maior em relação aos mármores, bem como exibe uma coloração alaranjada peculiar. Sua assinatura espectral exibe feições de absorção mais acentuadas, principalmente na posição referente à presença da molécula de  $\text{CO}_3$  (2,338  $\mu\text{m}$ ). Sua coloração alaranjada é bem marcada pelo alto de reflectância entre 0,58-0,62  $\mu\text{m}$  (Figura 3b).

Dentre as amostras analisadas, a presença de Fe-esmectita (nontronita) ficou restrita aos hidrotermalitos, e pôde ser identificada através da feição de absorção característica em 2,29  $\mu\text{m}$  (Figura 3c). A composição ferromagnésiana das illitas (posição da feição de AlOH em 2,218  $\mu\text{m}$ ) nos hidrotermalitos também não foi evidenciada nas amostras de rochas encaixantes à mineralização. A posição da feição de absorção relativa à presença da molécula de FeOH nas cloritas analisadas em amostras de hidrotermalitos (2,249  $\mu\text{m}$ ) sugere uma composição de tendência magnésiana, em comparação à mesma feição observada na composição das biotitas nos xistos das rochas encaixantes (FeOH = 2,253  $\mu\text{m}$ ) (Pontual *et al.*, 2008).

Os primeiros testes de classificação dos dados hiperespectrais da Mina de Brejuí foram feitos para cada faixa de voo individualmente, utilizando a correção atmosférica disponibilizada pela Fototerra – SpecTIR. Na faixa de voo sobre a mina/depósito (faixa #16), a classificação por meio do método SAM obteve 26 classes, que foram reagrupadas em 7 classes de acordo com a natureza dos materiais (misturas espectrais) (Figura 4a). O mapeamento espectral conseguiu individualizar classes que correspondem às exposições de rochas carbonáticas em que se hospedam os depósitos de W-Mo da Mina de Brejuí (Figura 4c, d). A assinatura espectral desta classe possui uma feição de absorção profunda em comprimento de onda típico dos carbonatos (2,341  $\mu\text{m}$ ), bem como uma feição de absorção em 2,291  $\mu\text{m}$ , que pode sugerir a presença de Fe-esmectita na mistura espectral (Figura 4b). No entanto, os primeiros resultados preliminares de *check up* posterior de campo, nos pontos mapeados pelos *endmembers*, indicaram a presença de artefatos nas assinaturas espectrais dos pixels mapeados, principalmente nas posições típicas dos argilominerais (2,160; 2,206  $\mu\text{m}$ ), bem como das Fe-esmectitas (2,291  $\mu\text{m}$ ). A feição típica dos carbonatos foi confirmada tanto em campo como nos pixels da imagem.

#### 4. Conclusões

Os primeiros resultados a respeito da Espectroscopia de Reflectância na Mina de Brejuí permitiram identificar principalmente os minerais pertencentes à paragênese retrogradacional, relacionada aos escarnitos de W-Mo, bem como distinguir suas variações composicionais em relação às rochas encaixantes. Adicionalmente, permitiu identificar minerais que aparentemente ocorrem de maneira mais restrita à zona mineralizada, como as Fe-esmectitas, Mg-cloritas, gipso e illita fengítica. A actinolita foi identificada em calcissilicáticas (mármore hidrotermalizados?) e, aparentemente, corresponde à alteração hidrotermal mais pervasiva no âmbito da assembleia retrogradacional. Adicionalmente, o aumento na profundidade da feição de absorção relativa aos carbonatos (2,338  $\mu\text{m}$ ) tem uma correlação positiva com a proximidade das zonas hidrotermalizadas, uma vez que corresponde a presença de calcitas recristalizadas nestas alterações.

A classificação dos dados hiperespectrais sobre a região da Mina de Brejuí obteve sucesso em mapear as rochas carbonáticas da Formação Jucurutu, que possuem o maior potencial em hospedar as mineralizações de W-Mo na região. No entanto, análises espectrais posteriores em pontos mapeados durante esta classificação indicam a necessidade de um melhor refinamento na correção atmosférica, no intuito de se obter uma assinatura espectral do pixel da imagem mais próxima com a verdade de campo, para que se permita testar o rastreamento das principais características espectrais dos depósitos de W-Mo em escarnitos da região de Brejuí.

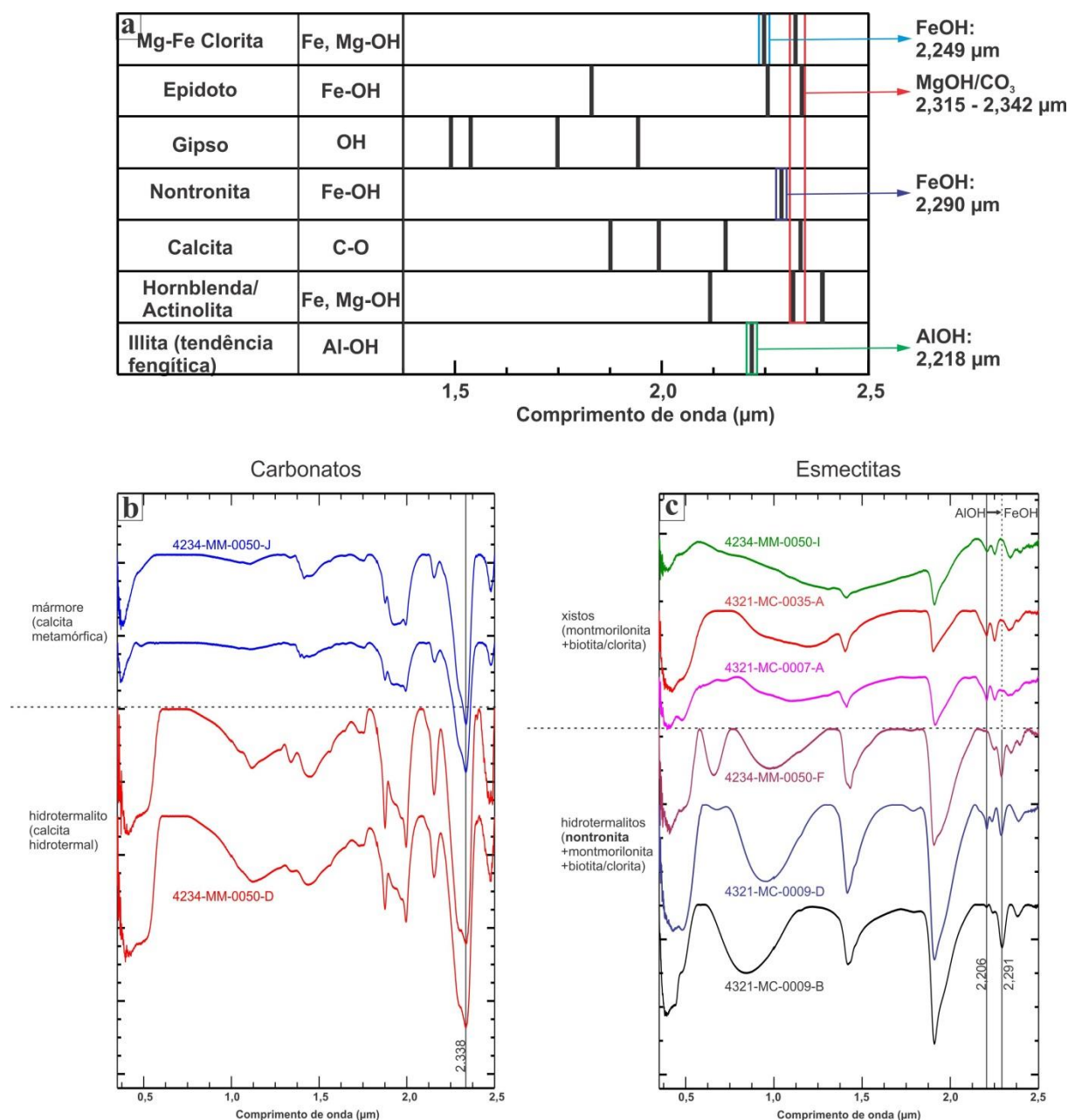


Figura 3. Principais resultados da Espectroscopia de Reflectância na Mina de Brejuí: a) Diagrama de assinatura espectral (SWIR) do depósito de Brejuí, com principais feições de absorção presentes na assembleia de alteração hidrotermal; b) Diferenças entre as assinaturas espectrais de carbonatos da rocha encaixante (mármore) e carbonatos recristalizados na zona de alteração hidrotermal; c) Comparativo entre espectros de misturas minerais, destacando a presença de Fe-esmeclita (nontronita) restrita a zona hidrotermalizada.

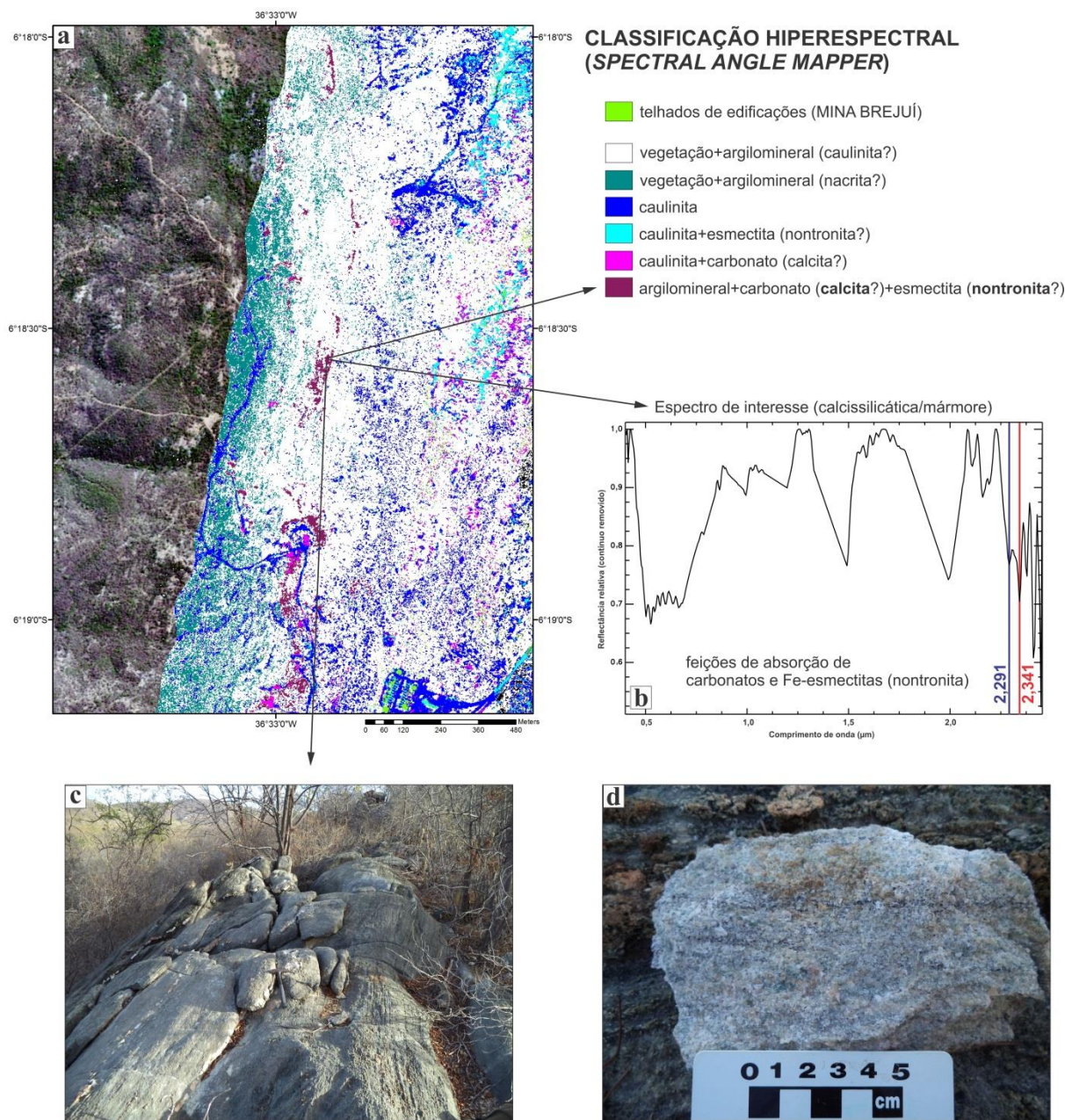


Figura 4. a) Ensaio de classificação espectral com classes de interesse mineral na área da Mina de Brejuí: Detalhe para a classe de cor vinho, de maior interesse prospectivo b) Assinatura espectral representativa dessa classe, com destaque para as bandas de absorção devidas ao carbonato e as argilas; c) Afloramento de rocha carbonática correspondente à classe espectral mapeada; d) Detalhe da rocha carbonática aflorante.

### Agradecimentos

Equipe do projeto ARIM – Seridó, CPRM – Recife (PE) / Natal (RN):

- Rogério Cavalcante;
- André Luiz Carneiro da Cunha;
- Vladimir Cruz de Medeiros;
- Alan Pereira da Costa.

## Referências Bibliográficas

- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R. Províncias estruturais brasileiras. In: 8º Simpósio de Geologia do Nordeste, 1977. **Anais**, p. 363-391.
- Cavalcante, R.; Cunha, A. L. C.; Medeiros, V. C. **Programa Geologia do Brasil – PGB. Projeto Províncias Metalogenéticas do Brasil: Área PB – RN (Borborema Leste)**. Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. 1 mapa colorido, 90,00 x 115,00 cm. Escala 1:250.000. 2015.
- Clark, R. N.; Swayze, G. A.; Gallagher, A.; King, T. V. V.; Calvin, W. M. **The U. S. Geological Survey Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 mm**. [EUA]: USGS, 1993. 1326 p. (Open File Report, 592).
- Clark, R. N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz A. (ed.) **Manual of Remote Sensing**, 3, New York, Wiley and Sons Inc, 1999. p. 3–58.
- Johnston Jr., W.D.; Vasconcellos, F.M. Scheelite in northeastern Brazil. **Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists**, 40(1):34-50, 1945.
- Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. B.; Heidebrecht, K. B.; Shapiro, A. T.; Barloon, P. J.; Goetz, A. F. H. The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 145–163, 1993.
- Legrand, M.; Melo, G.; Archanjo, C.; Salim, J.; Souza, L. C.; Maia, H. N. Mineralizações da Faixa Seridó: um processo hidrotermal do fenômeno tectono-magmático brasileiro. In: 15º Simpósio de Geologia do Nordeste, Natal, **Atas** 13, 1993. p. 185-188.
- Neto, J. A. S.; Legrand, J. M.; Volfinger, M.; Pascal, M. L.; Sonnet, P. W–Au skarns in the Neo-Proterozoic Seridó Mobile Belt, Borborema Province in northeastern Brazil: an overview with emphasis on the Bonfim deposit. **Mineralium Deposita**, 43(2): 185-205, 2008.
- Oliveira, A. I. de. L. **Geologia do Brasil**. 2º edição. Rio de Janeiro, Min. da Agricultura, 1942.
- Pontual, S.; Merry, N.; Gamson, P. G-MEX – **Spectral analysis guides for mineral exploration—spectral interpretation field manual**. AusSpec International Pty., Ltd., Kew, Victoria 3101, Australia, 2008. 189p.
- Sabine, C. Remote Sensing Strategies for Mineral Exploration. In: Rencz A.N. (Ed.), **Remote sensing for the earth sciences - manual of remote sensing**. John Wiley and Sons, Inc., 1999. p. 375-447.
- Salim, J. **Geologie, petrologie et geochemie des skarns a scheelite de la Mine Brejui, Currais Novos, Region du Serido, NE du Brésil**. 1993. 272p. PhD Thesis, Laboratoire de Geologie et Minerlogie, Université Catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve. 1993.
- Silva, S. M. P. **Espectroscopia de imageamento e gamaespectrometria aérea e terrestre de pegmatitos e granitos da porção sul da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), Nordeste Brasil**. 2009. 173 p. PhD Thesis – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2009.
- Silva, M.G.; Neto, M.B.R.; Jost, H.; Kuyumjian, R.M. **Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras**. Serviço Geológico do Brasil – CPRM: Belo Horizonte, 2014. 589 p.