

Aplicações do *scanner* hiperespectral HyMap como suporte à prospecção uranífera: estudo de caso na área do depósito metamórfico-hidrotermal de U-ETR *Mary Kathleen*, NW Queensland, Austrália

Rodrigo dos Reis Salles^{1,2}
Carlos Roberto de Souza Filho¹
Thomas Cudahy³

¹ Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/IG
Caixa Postal 6152 – 13083-970 – Campinas-SP, Brasil
sallesgeologia@yahoo.com.br, beto@ige.unicamp.br

² AngloGold Ashanti Córrego do Sítio SA – Brasil
Gerência de Projetos e Crescimento – Projetos Step Change

³ Mineral Mapping Technology Group
CSIRO Division of Exploration and Mining
thomas.cudahy@csiro.au

Abstract. The Mary Kathleen (MK) metamorphic-hydrothermal U-REE deposit is located in NW Queensland, Australia and comprised in the Mount Isa Metamorphic Province. The area includes sedimentary (limestone, shales), volcanics (rhyolite, basalt, dacite) and intrusive rocks (granodiorite, porphyritic leucogranite), metamorphosed at greenschist to amphibolites facies. The MK deposit is associated with skarns enriched in U-REE. Such deposit type differs from other U deposits as it comprises specific calc-silicate alteration, intense garnetization and association to contact-metasomatic processes. In this study, hyperspectral signatures that can be used to vectorize U mineralizations are investigated. Data acquired by the HyMap hyperspectral sensor (128 bands between the visible-near infrared and shortwave infrared wavelengths – 350-2500nm) were processed through a sequence of information extraction techniques aiming to reveal multiple, detailed mineral spatial distributions and abundances at the deposit scale. This approach rendered hyperspectral signatures of U ore-related and host rock minerals of the MK deposit. Some of the prime minerals, such as andradite, epidote, hornblende, calcite and scapolite, were plausibly detectable remotely. The spectral analysis also unveiled goethite, kaolinite and montmorillonite within the mine pit and adjacent areas, which are minerals probably formed by weathering of the underlying, fresher rocks. Mineral abundance maps yielded from HyMap data processing with spectral unmixing algorithms were also combined as false color composite renditions. This strategy allowed the simultaneous enhancement of sites with dominant minerals and their mixtures, which can be widely applied to detailed U prospectivity mapping.

Palavras-chave: Uranium deposits, skarns, HyMap hyperspectral sensor, depósitos de Urânio, escarnitos, sensor hiperespectral HyMap.

1. Introdução

O advento do *scanner* aerotransportado HyMap (Hyperspectral Mapper) tem incrementado os segmentos de prospecção mineral australiano. Esse sistema sensor possui resolução hiperespectral (126 bandas espectrais), alta resolução espacial (4.5 m) e alta relação sinal/ruído, cobrindo as faixas espectrais do *Visible-Near Infrared* (VNIR) com 64 bandas e do *Short Wave Infrared* (SWIR) com 62 bandas. A ascensão da commodity U no mercado internacional trouxe a retomada de antigos projetos de prospecção de U na Austrália. Nesse sentido, a Mina *Mary Kathleen* (Austrália) compreende um excelente laboratório para pesquisa de feições espectrais em *skarns* mineralizados em U-ETR. No presente estudo, são investigadas assinaturas hiperespectrais de detalhe extraídas de dados do sensor HyMap e que constituem possíveis vetores da mineralização uranífera do tipo *Mary Kathleen*.

2. Localização & Contexto Geológico Regional

A área de estudo localiza-se a noroeste de *Queensland* (Austrália), a aproximadamente 1500 km da capital *Brisbane* (Figura 1A). A geologia do distrito da Mina *Mary Kathleen* engloba o arcabouço Paleoproterozóico da Província Metamórfica *Mount Isa* (PMMI) – uma das regiões mais prospectivas do mundo para depósitos metálicos. A PMMI está compartimentada em três domínios tectono-metamórficos segundo orientação N-S denominadas, de oeste para leste, de Cinturão de Dobramentos *Western* (CDW), Faixa *Kalkadoon–Ewen* (FKE) e Cinturão de Dobramentos *Eastern* (CDE) (Figura 1B).

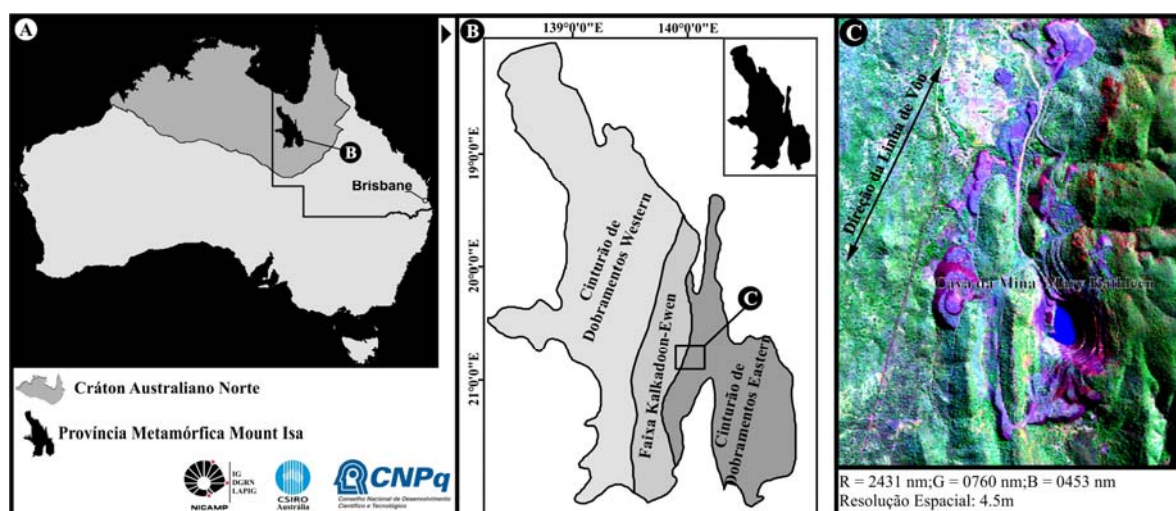


Figura 1. (A) Contexto tectônico regional. (B) Compartimentação morfotectônica da Província Metamórfica *Mount Isa*. (C) Área do *pit* da Mina de U-ETR *Mary Kathleen* ilustrada em composição colorida falsa-cor de bandas (2431 nm, 760 nm, 453 nm) (RGB) do scanner HyMap.

2.1. Modelo Descritivo: Suporte para o Mapeamento Remoto

Oliver *et al.* (1999) sugerem uma história de alteração cálcio-silicática polifásica para o processo mineralizante da Mina *Mary Kathleen*. Neste contexto, a gênese e a mineralização dos *skarns* estão intrinsecamente relacionadas a dois episódios, um período de metassomatismo de contato e adição de fluidos magmáticos derivados das intrusões do Granito *Burstall* (1ª Fase – ~1740 Ma) e um período de mineralização durante o metamorfismo regional denominado *Isan* (2ª Fase – ~1550 Ma).

A adição de grandes quantidades de sílica no processo de formação dos *skarns* (~1750 Ma) resultou na gênese das assembléias minerais cálcio-silicatadas sumarizadas na Tabela 1.

Segundo Matheson & Searl (1956), a mineralização é considerada epigenética e possui especial relação com halos de alteração formados por minerais cálcio-silicatados representados pela paragênese mineral allanita+andradita+uraninita (Oliver *et al.* 1999).

3. Métodos

A detecção de minerais relacionados a depósitos metálicos tem sido amplamente estudada. Nesse trabalho, um conjunto de procedimentos foi organizado e testado para a detecção dos minerais vetores da mineralização na Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, envolvendo (i)

espectrorradiometria (medidas com o espectrorradiômetro *FieldSpec High Resolution* (ASD) de amostras de escapolita;/ (ii) transformação EFFORT (Boardman 1998); (iii) transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) (Green *et al.* 1998) e (iv) classificação supervisionada com o *Spectral Angle Mapper* (SAM) e o *Mixture Tuned Matched Filtering* (MTMF) (Kruse *et al.* 1993; Boardman & Kruse 1994, Boardman 1998).

Tabela 1. Relação dos minerais metassomáticos diagnósticos dos *skarns* na Mina de U-ETR *Mary Kathleen* (Oliver *et al.* 1999).

Rochas	Paragêneses Minerais	T (°C)	Fases de Alteração
Diques e veios; Alteração do <i>skarn</i> preexistente	escapolita+albita+epidoto+titanita; epidoto+albita+prehnita+hematita+granada*; calcita+clorita+tremolita/actinolita+epidoto(+apatita+hematita+prehnita)	300°–350°	2ª Fase Metamórfico-Hidrotermal, Posicionamento dos Batólitos <i>Williams</i> e <i>Naraku</i> ~1550–1500 Ma; Cálcio-silicáticos secundários
<i>Skarn</i> mineralizado em U-ETR	allanita+andradita+uraninita escapolita+apatita+quartzo (+anfíbólio+calcita+epidoto) ±calcopirita±hematita	400°–550°	
Granofels enriquecidos em granada	granada*+escapolita+salita/ferrosilita+(microclínio+plagioclásio+quartzo)	500°–650°	1ª Fase Magmático-Hidrotermal ~1750–1730 Ma; Cálcio-silicáticos primários
<i>Skarn</i> enriquecido em granadas	granada+escapolita+diopsídio / ferrosilita +calcita+quartzo		

4. Resultados & Discussão

O suporte fornecido pelo modelo descritivo do depósito de U-ETR *Mary Kathleen* permitiu definir os *endmembers* de *input* na classificação hiperespectral. Diante das áreas previamente classificadas, foram extraídos da imagem HyMap espectros correlatos aos de referência (USGS) a fim de construir bibliotecas espectrais com *endmembers* do HyMap para futuras classificações.

Os mapas de abundância mineral foram ajustados posteriormente por técnicas de processamento digital de imagem. O realce linear nos histogramas destas imagens permitiu eliminar os *pixels* (falsos positivos). Esses mapas foram então combinados no espaço de cores RGB. Esta técnica delimitou com eficiência as misturas minerais na Mina *Mary Kathleen*.

Ao analisar os mapas de abundâncias para os minerais andradita+epidoto+hornblenda (Figura 2A), nota-se a existência do domínio espectral da andradita sobre as outras espécies minerais. Entretanto, é possível distinguir áreas onde ocorrem as fases minerais andradita+hornblenda (magenta). Também foi possível delimitar claramente áreas com andradita+epidoto (amarelo-laranja). Nos mapas de abundância andradita+epidoto+calcita (Figura 2B), o domínio espectral da andradita prevaleceu, como já observado. As áreas de abundância de calcita correlacionaram-se, parcialmente, com as áreas realçadas para hornblenda (Figura 2A). Na frente de lavra ocorrem as associações epidoto+calcita (ciano) circunscrito por andradita e calcita. À noroeste da frente de lavra observam-se áreas levemente epidotizadas (verde), limitadas pela mistura calcita+epidoto. Subordinadamente, nesta mesma área correlacionam-se misturas com abundância de andradita+epidoto+calcita (branco), limitadas por calcita+epidoto e calcita.

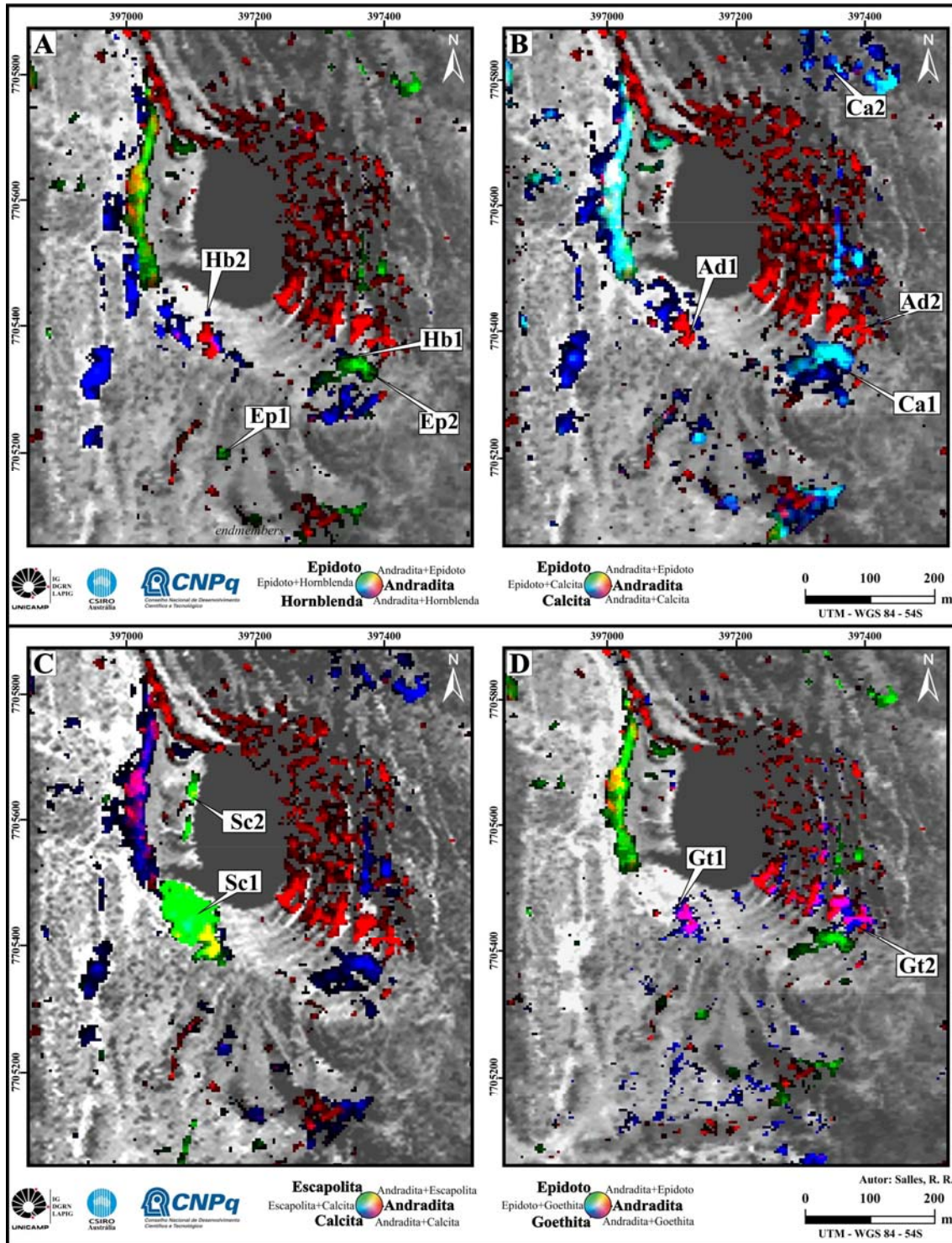


Figura 2. Mapas de abundância mineral. (A) andradita+epidoto+hornblenda e (B) andradita+epidoto+calcita são espacialmente correlacionáveis, (C) andradita+escapolita+calcita e (D) andradita+epidoto+goethita. Os rótulos (A) Hb (hornblenda), Ep (epidoto), (B) Ad (andradita) e Ca (calcita), (C e D) Sc (escapolita) e Gt (goethita) identificam os espectros impresso na Figura 4.

A Figura 2C representa áreas de abundância de andradita+escapolita+calcita. Observa-se no mapa, realce de escapolita à sul da cava da mina, correlata à Zona de Cisalhamento *Mary Kathleen*. Esta assinatura indica que provavelmente este litotipo fora extensivamente afetado por fluidos hidrotermais hipersalinos e alterado por metassomatismo Na-Ca. Neste mesmo local, ocorrem *pixels* com a mistura andradita+escapolita (amarelo) tendendo à escapolita. Subordinadamente, a associação escapolita+calcita é realçada em tons de ciano. A presença simultânea dos minerais andradita+calcita resultou em *pixels* de tons magenta. Áreas com abundância de goethita (azul) (Figura 2D) ocorrem circunscritas pelo mineral primário andradita. Estas abundâncias corroboram com as descrições documentadas por Matheson & Searl (1956), que relatam ocorrências de zonas superficiais oxidadas. Este fato agrega credibilidade ao mapa de abundância de goethita. Na Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, a abundância desse mineral em determinados setores pode estar associada à decomposição por hidrólise.

A associação de andradita+goethita (magenta) é mais evidente à sul da cava da mina (Figura 2D). Áreas mais restritas ocorrem junto à andradita e epidoto (verde). Apesar do forte intemperismo e da extensa formação de regolitos (comuns nessa região da Austrália e que mascaram as anomalias geoquímicas), o uso criterioso de mapas que evidenciem áreas com abundância de goethita quando associada à paragênese de minerais cálcio-silicáticos, pode contribuir positivamente para prospecção uranífera.

Os resultados obtidos para a associação mineral goethita+escapolita+caulinita (Figura 3A) e caulinita+montmorillonita+escapolita (Figura 3B) foram satisfatórios. No entanto, para a área de estudo, não há uma relação estabelecida na literatura entre minerais da paragênese cálcio-silicatada e seus equivalentes supergênicos. Na Figura 3A é possível observar zonas com abundância de goethita (vermelho) orientadas segundo direção NW-SE. Observa-se que a escapolita (verde) tende a se misturar com a goethita nas partes mais superficiais. Esta mistura, traduzida no mapa por *pixels* amarelos, tende a ficar evidente pela presença de goethita. Também são evidenciados *pixels* com a associação goethita+caulinita (magenta).

O mapa de abundância da caulinita+montmorillonita+escapolita (Figura 3B) realçou de forma mais intensa a mistura caulinita+montmorillonita (amarelo) nas proximidades da cava da mina e a mistura montmorillonita+escapolita (ciano) envolta por abundante escapolita (azul). Observa-se que na parte ocidental da cava ocorre uma dominância da mistura caulinita+montmorillonita, orientada segundo direção N-S. Subordinadamente, áreas com abundância de caulinita (vermelho) prevalecem sobre montmorillonita (verde) em tons de laranja. “Ilhas” de *pixels* com abundância de montmorillonita (verde) são identificadas na frente de lavra e se correlacionam com áreas onde ocorre abundância de minerais cálcio-silicáticos e goethita, cartografadas nos mapas anteriores.

Para verificar a consistência dos mapas de abundância mineral, as assinaturas espectrais dos *pixels* das áreas de maior abundância foram verificados interativamente. Portanto, os espectros estampados na Figura 4 reduzem a subjetividade de outros métodos utilizados para segregar os *pixels* corretamente mapeados daqueles denominados ‘falsos positivos’.

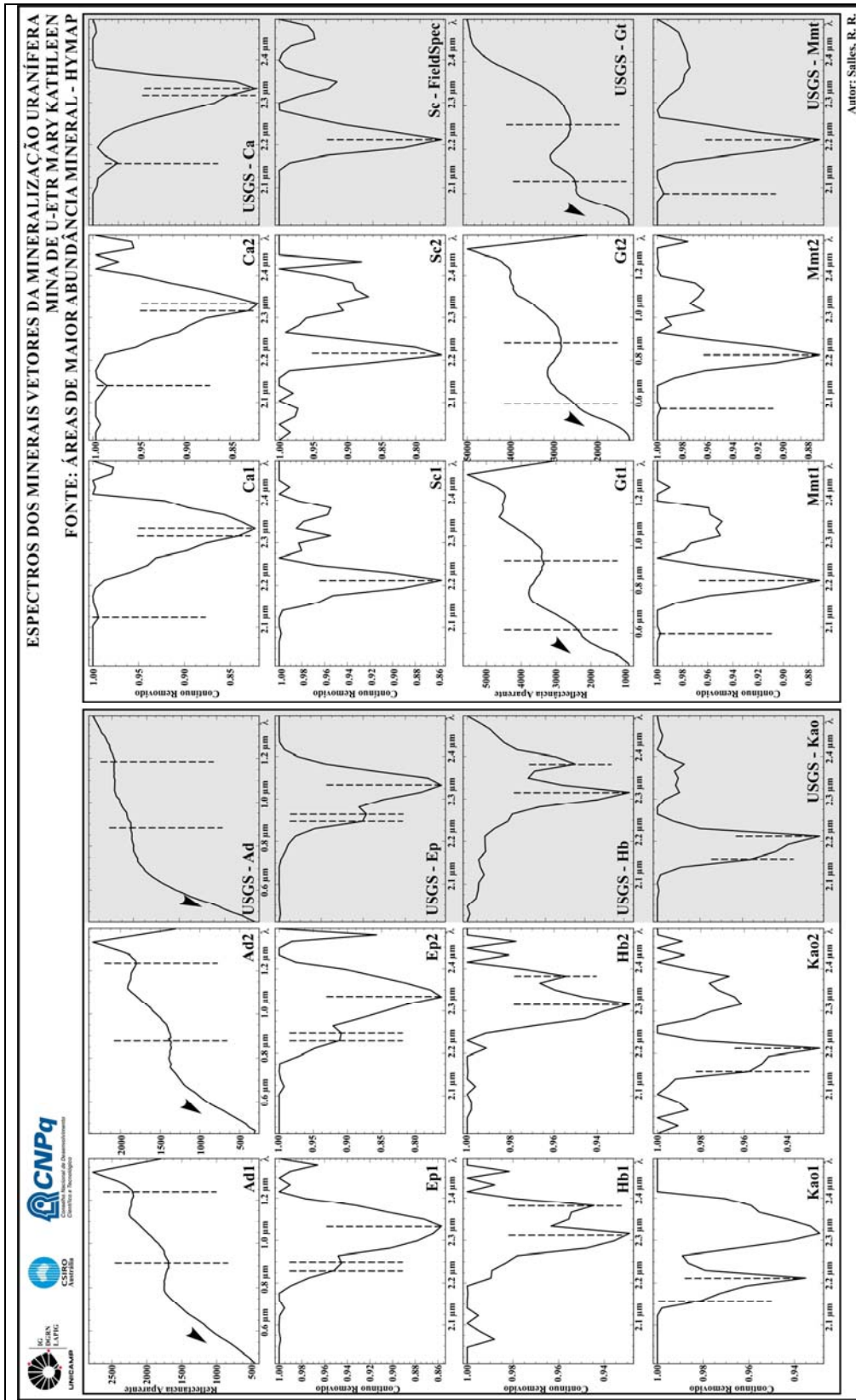


Figura 4. Espectros extraídos dos pixels das áreas de maior abundância mineral para cada mineral investigado. As siglas representam os minerais andradita (Ad), epidoto (Ep), homblenda (Hb), caulinita (Kao), calcita (Ca), escapolita (Sc), goethita (Gt) e montmorillonita (Mmt). As linhas verticais salientam as principais feições de absorção. Os espectros utilizados da Biblioteca Espectral do USGS foram Andradite GDS12, Epidote GDS26.a 75-200 µm, Hornblende_Mg NMNH17329, Kaolinite CM9, Calcite WS272, Goethite WS222, Montmorillonite SWy-1. O espectro da escapolita foi mensurado por meio do espectrorradiômetro FieldSpec.

A adição das imagens *Rules* e *MS Score* no espaço de cores RGB simulou com eficiência a relação existente entre os minerais cálcio-silicáticos superficiais da mina. Ficaram evidentes áreas com domínio da andradita sobre outros espectros minerais, além do zoneamento entre os mesmos. Estas informações foram traduzidas em mapas de abundância mineral que são de ampla utilidade na pesquisa uranífera de detalhe.

A goethita pode estar intrinsecamente ligada à decomposição dos sulfetos por hidrólise. A feição de absorção diagnóstica da caulinita - argilomineral abundante em depósitos de diferentes *commodities* - indica ordenamento no grau de cristalinidade moderado. Este fato tem implicações diretas nas atividades de prospecção mineral, pois, por meio da análise no ordenamento estrutural desse mineral, áreas com alterações hidrotermais podem ser evidenciadas;

Os resultados positivos alcançados na caracterização de parte da mineralogia cálcio-silicática da Mina de U-ETR *Mary Kathleen*, agora podem ser aplicados para amplas áreas imageadas pelo scanner HyMap. Com isso, áreas de abundância classificadas a partir das assinaturas de assembléias minerais similares aquelas aqui mapeadas podem ser alvos em potencial para a pesquisa mineral uranífera regional.

Referências Bibliográficas

- Boardman, J. W. ; Kruse, F. A. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in **Proceedings, ERIM 10th Thematic Conference on Geological Remote Sensing**, Ann Arbor, MI, p. I-407– I-418, 1994.
- Boardman, J. W. Mineralogy and geochemical mapping at Virginia City, Nevada using 1995 AVIRIS: a lesson in accuracy versus precision, in **Summaries of the 7th JPL Airbone Earth Science Workshop**, v.1, p. 53, 1998.
- 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.44:145–163, 1993.
- Green, A. A. ; Berman, M. ; Switzer, P. ; Craig, M. D. A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implications for Noise Removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.26: 65–74, 1998.
- Matheson, R. S. ; Searl, R. A. Mary Kathleen Uranium Deposit, Mount Isa-Cloncurry District, Queensland, Australia. **Economic Geology**, v.51:528–540, 1956.
- Oliver, N. H. S. ; Pearson, P. J. ; Holcombe, R. J ; Ord, A. Mary Kathleen metamorphic-hydrothermal uranium rare-earth element deposit: ore genesis and numerical model of coupled deformation and fluid flow. **Australian Journal of Earth Sciences**, v.46:467–484, 1999.