

# MAPEAMENTO DE ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL ASSOCIADAS A MINERALIZAÇÕES URANÍFERAS: APLICAÇÕES DO SENSOR ASTER NO DOMÍNIO CENTRAL DO CINTURÃO DE DOBRAMENTO *MARY KATHLEEN*, AUSTRÁLIA

Rodrigo dos Reis Salles<sup>1</sup>  
Carlos Roberto de Souza Filho<sup>1</sup>  
Thomas Cudahy<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/IG/DGRN  
Caixa Postal 6152 – 13083-970 – Campinas-SP, Brasil  
(salles, beto)@ige.unicamp.br

<sup>2</sup> Mineral Mapping Technology Group  
CSIRO Division of Exploration and Mining  
thomas.cudahy@csiro.au

**Abstract.** The recent global race for energy resources interrupted the ‘state of inertia’ where was the search of geological occurrences of uranium. Thus the incentive for discovery a new prospects and the resumption of old projects amounted to search this mineral commodity. The resumption comes at a time of full development of computer applications in geology conventional. This metamorphic deposit developed in carbonate rocks and calcic skarn. Uranium anomalies are approximately coincident with calcite, dolomite, kaolinite, chlorite and tourmaline, beyond hematitization zones. Its location in the semi-arid region of Australia, the exhibition geological in large areas and the numerous mineral occurrences are appealing to the applications of spectral mineral mapping. Therefore, this work was to compile digital maps of pathfinder minerals and hydrothermal alteration from images of multispectral sensor subsystems VNIR (visible and near infrared) and SWIR (shortwave infrared) the sensor ASTER, because this images provided preliminary mineralogic information and geo-referenced alteration maps at low cost and with high accuracy. In this way ASTER has been proven to be a powerful data in the initial steps of ore deposit exploration.

**Palavras-chave:** uranium, mineral exploration, hydrothermal alteration, ASTER, Australia, urânio, exploração mineral, alteração hidrotermal, ASTER, Austrália.

## 1. Introdução

No início dos anos 80, o pouco interesse em metais radioativos gerou uma lacuna na pesquisa de urânio. Esta lacuna refletiu na carência global de profissionais especializados e no estado da arte do conhecimento relacionado à distribuição, gênese e forma de ocorrências dos depósitos uraníferos. Contudo, a crescente demanda energética, o déficit na produção e o aumento substancial do preço do urânio na década de 90, condicionaram uma corrida mundial em busca deste recurso (Scott 1978, Moon 2006, Heffenan 2007).

Atualmente, de comum aplicação na exploração mineral, o sensoriamento remoto tem sido empregado amplamente para identificar assinaturas espectrais diagnósticas de minerais de alteração hidrotermal (e.g., Drury 2001, Moon 2006).

Desde o início desta década, o sensor multiespectral *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) tem sido empregado em estudos litológicos e mineralógicos (Ninomiya 2002). O intervalo espectral dos dados do sensor ASTER, favorável ao mapeamento de alguns minerais e assembléias minerais específicas e a cobertura global, adicionou novas perspectivas à exploração mineral em terrenos pouco conhecidos. Esse instrumento consiste em três subsistemas independentes com total de 14 bandas espectrais distribuídas na região do visível e infravermelho próximo (VNIR - Visible Near InfraRed), infravermelho de ondas curtas (SWIR - Short Wave InfraRed) e infravermelho termal (TIR - Thermal InfraRed), além do estereopar (bandas 3B e 3N). Cada cena ASTER cobre uma área

de 60X60 km<sup>2</sup>, o que torna esse tipo de dado útil para o mapeamento regional (Abrams e Hook 2002). A aptidão geológica das imagens do sensor ASTER, seja no mapeamento geológico e/ou na detecção de materiais de alteração hidrotermal na superfície terrestre, está registrada em numerosas publicações (Crósta et al 2003; Ducart, 2004; Souza Filho et al 2003; Zhang et al 2007). Por outro lado, convém salientar que há poucas aplicações do sensor ASTER publicadas relacionadas à exploração da *commodity* urânio, o que justamente motivou esta pesquisa.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem por objetivo: (i) caracterizar, por sensoriamento remoto, novos alvos com ocorrências dos minerais satélites e/ou de alteração hidrotermal associados ao depósito de urânio de *Mary Kathleen*, Austrália e (ii) avaliar a correlação do mapeamento espectral de minerais específicos com dados previamente levantados (e.g., mapa litológico e ocorrências minerais).

## 2. Área de estudo

O depósito de U-ETR de *Mary Kathleen* (Matheson e Searl 1956) encontra-se a NW do estado de *Queensland*, em terrenos Paleoproterozóicos da província metamórfica *Mount Isa*. Localiza-se a cerca de 60 km dos distritos mineiros *Mount Isa* e *Cloncurry*, nas coordenadas 140° 00' 45" de longitude E e 20° 44' 50" de latitude S (Figura 1).

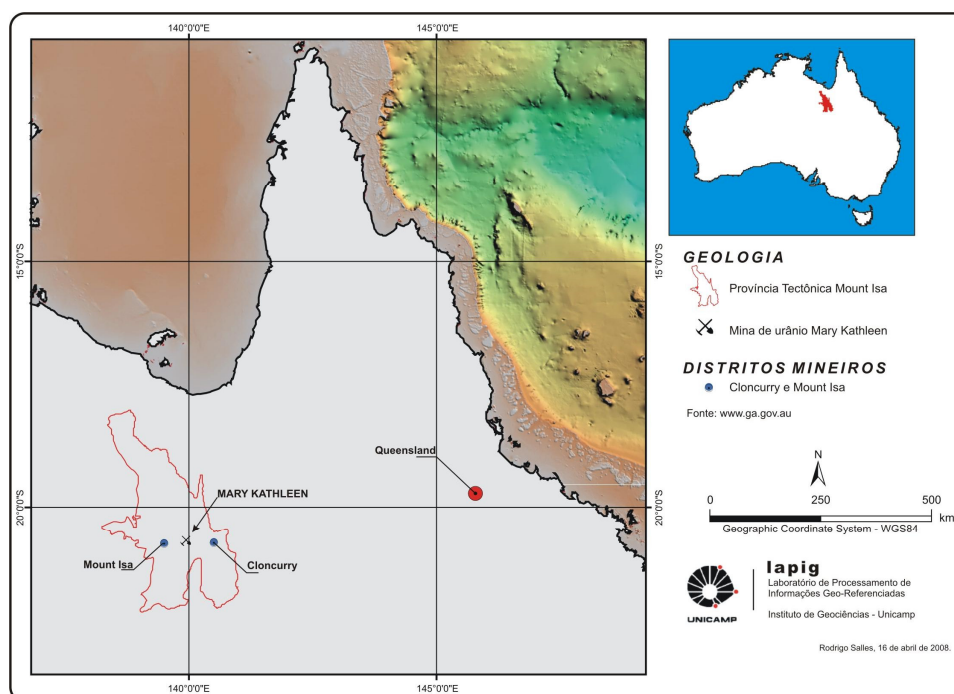


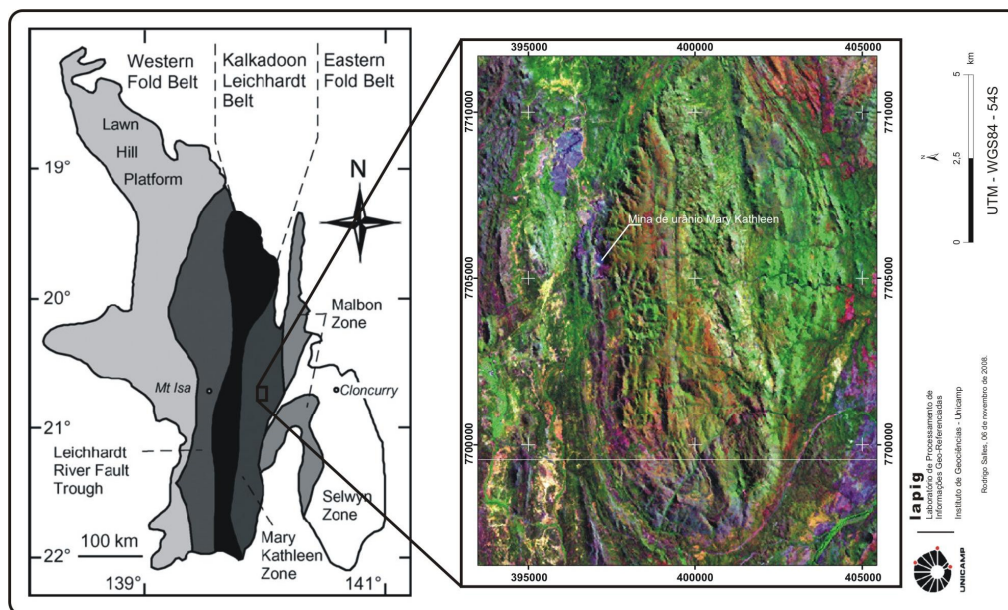
Figura 1. Localização da área de estudo em território australiano.

## 3. Características geológicas

A mina de urânio *Mary Kathleen* (Matheson e Searl 1956) situa-se na porção central da província tectônica *Mount Isa*. Este terreno expõe extensas áreas de rochas de idades paleoproterozóica e mesoproterozóica. A província *Mount Isa* foi compartimentada em três unidades tectônicas com orientação norte-sul: a faixa de dobramento *Western*, a faixa *Kalkadoon-Leichhard* e a faixa de dobramento *Estern* (Figura 2). As principais mineralizações da área associam-se ao principal período de deformação, denominado orogenia *Isa* (1585–1500 Ma). Este período foi acompanhado por metassomatismo cálcio-alcalino (Na-Ca-K) e escapolitização por fluídos hipersalinos. Nas zonas mineralizadas há

predomínio de escarnitos ricos em Fe e compostos por granada, feldspato e escapolita, além de uraninita associada a minerais como alanita e apatita. Ocorrem clorita, turmalina, pirita e calcopirita, todos associados a escapolita (Kwak 1987, Page 1983).

Nesse cenário geológico, há registro de uma complexa, mas periódica história de sedimentação, magmatismo, tectonismo, metamorfismo e mineralizações. Além do notável e recorrente metassomatismo regional (albitização em diferentes estágios) observado nos depósitos de alteração hidrotermal (Betts et al 2003).



**Figura 2.** Limite das unidades estruturais da Província *Mount Isa* (Betts 2006). A imagem de satélite destaca a estrutura sinclinal de *Mary Kathleen*.

## 4. Materiais e Métodos

Foram utilizadas 9 bandas do sensor ASTER nos intervalos do espectro eletromagnético do VIS (0,52 – 0,69  $\mu\text{m}$ ), NIR (0,78 – 0,86  $\mu\text{m}$ ) e SWIR (1,60 – 2,43  $\mu\text{m}$ ).

### 4.1. Pré-processamento

O pré-processamento compreendeu: (i) a fusão das bandas do SWIR com as bandas do VNIR, onde as bandas do SWIR foram re-amostradas para a resolução espacial de 15 m; (ii) conversão dos dados de DN (Digital Number) para radiância, a partir da multiplicação dos coeficientes de calibração de cada banda; e (iii) correção atmosférica da cena para minimizar o efeito de espalhamento e absorção de gases atmosféricos. Para tanto foi utilizado o MODTRAN (Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model), no *software* ACORN (Atmospheric Correction Now), a partir do qual obteve os dados em reflectância. O propósito dessa última rotina é viabilizar a comparação dos espectros de reflectância dos *pixels* com espectros de minerais de referência (medidos no campo ou extraídos de bibliotecas espectrais) e sua possível identificação na cena (e.g., Souza Filho et al 2003).

## 4.2. Processamento digital de imagem

### 4.2.1. Razão de bandas

As razões de bandas foram implementadas em três etapas: (i) razão das bandas B2/B1 para obter a abundância de  $\text{Fe}^{3+}$ ; (ii) razão e soma das bandas (B5/B3)+(B1/B2), de forma a realçar a abundância de  $\text{Fe}^{2+}$ ; e (iii) razão entre os produtos  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  indicativo de áreas

potencialmente alteradas e com ocorrência de minerais com alta razão  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ , em particular, hematita associada com k-feldstato, sericita, clorita e epidoto (Robb 2004). Optou-se por mapear áreas com estilo de alteração do tipo hematitização, pelo fato dos escarnitos mineralizados em urânio serem ricos em Fe.

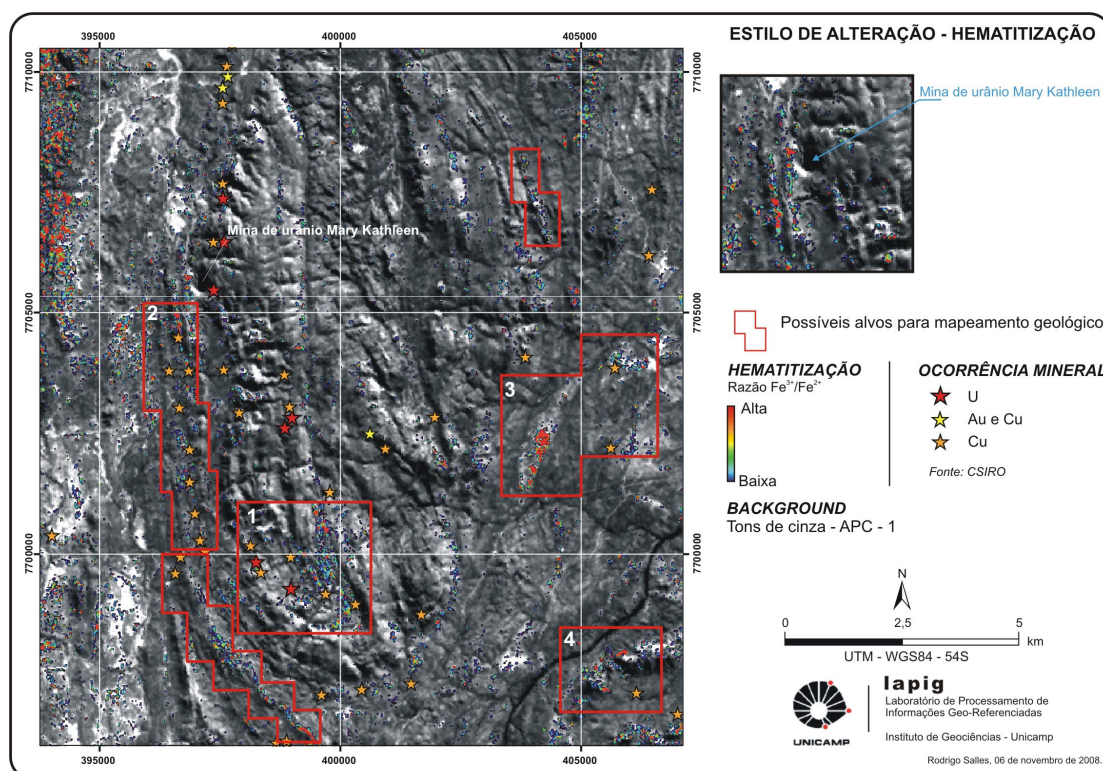
#### 4.2.2. Mapeamento espectral de minerais

A técnica de classificação supervisionada *Spectral Feature Fitting* (SFF) para imagens hiperespectrais, compara, por meio do método dos mínimos quadrados, a característica comum de uma banda de absorção presente em um determinado intervalo espectral no espectro de um pixel com feições equivalentes presentes nos espectros de referência. Neste caso, usou-se como referência a biblioteca espectral do USGS re-amostrada para a resolução espectral do sensor ASTER. Para esse estudo preliminar, baseado nas publicações aqui referenciadas, selecionaram-se os espectros dos seguintes minerais: caulinita, clorita e turmalina, além da mistura dos espectros minerais da dolomita+calcita.

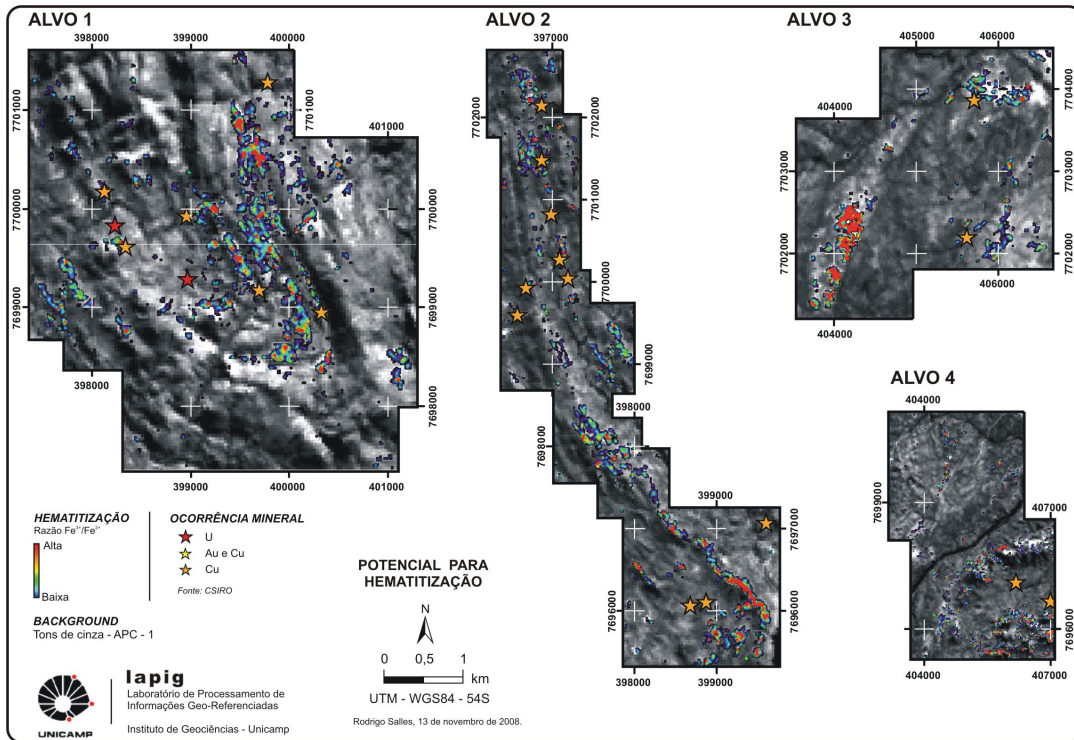
### 5. Discussão dos resultados

#### 5.1. Razão de bandas

Apesar da simplicidade, a técnica de razão de bandas (**Figura 3 e 4**), da forma como aqui utilizada, foi eficiente na discriminação dos materiais superficiais. Esta técnica realçou de forma singular áreas ricas em hematita, além de sua correlação com ocorrências minerais de U, Cu e Au. A hematitização é conhecida como uns dos principais estilos de alteração nesse tipo de depósito e está freqüentemente associada a fluídos oxidantes e a ambientes hidrotermais diversos (Kwak 1983, Robb 2004).



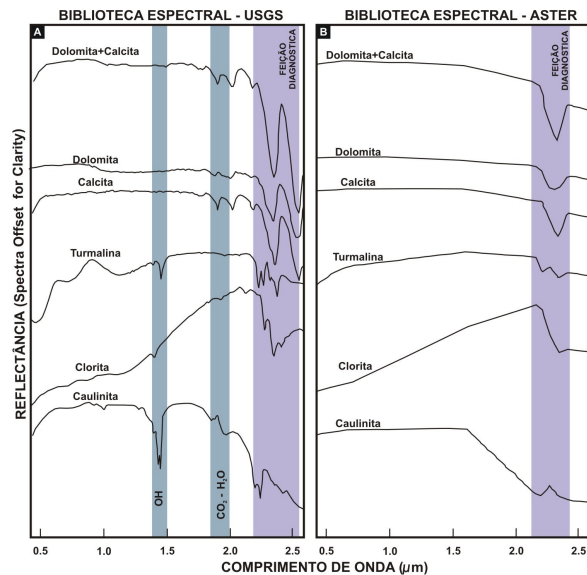
**Figura 3.** Abundância de hematita mapeada pelos dados do sensor ASTER. Os alvos com potencial de investigação em campo foram delimitados em vermelho e os alvos numerados serão mostrados na figura a seguir com maior detalhe.



**Figura 4.** Correlação com as principais ocorrências minerais. A alta abundância de hematita é mostrada em pseudocor após ajuste do histograma. Áreas com maior abundância estão representadas por vermelho.

## 5.2. Mapeamento espectral de minerais

Por meio do algoritmo SFF, técnica a princípio mais refinada que a razão de bandas, otimizou-se o processo de identificação mineral. Assim, foi possível determinar a distribuição da caulinita, clorita, turmalina, mistura dolomita+calcita, a partir das respectivas assinaturas espectrais (**Figura 5**).

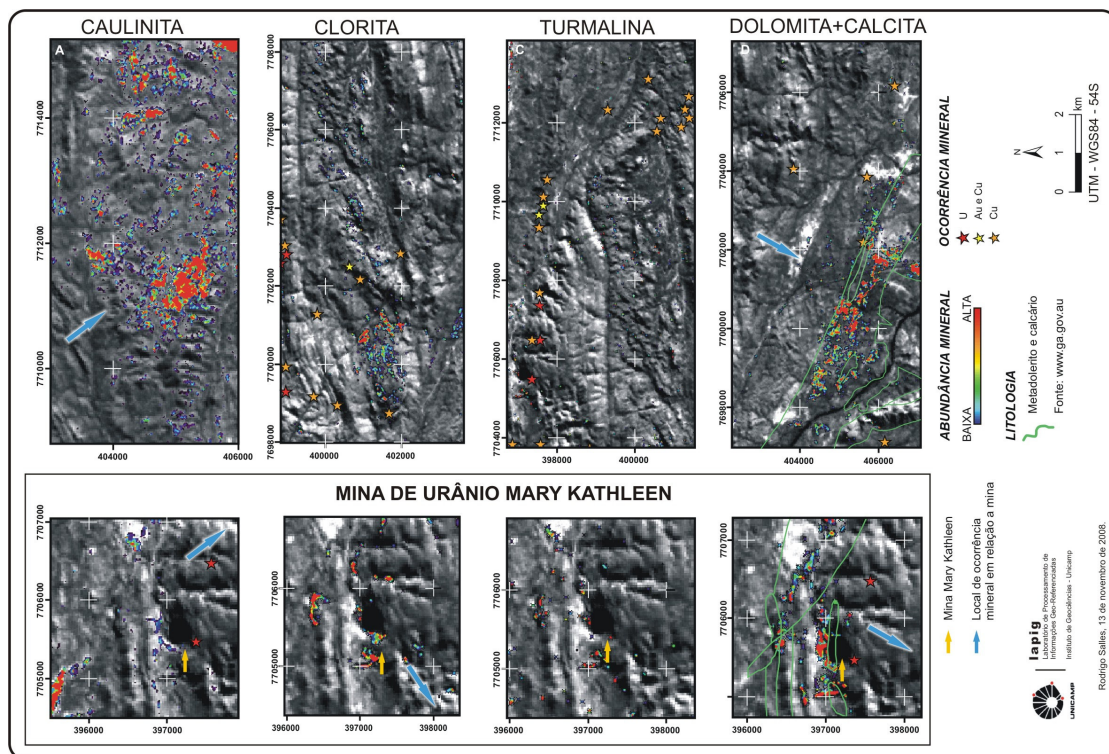


**Figura 5.** (A) Espectros dos minerais de maior relevância para o estudo de urânio na área de *Mary Kathleen* e a soma dos espectros da dolomita+calcita, regiões de maior absorção atmosférica (OH, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O) e feições diagnósticas dos respectivos minerais. Em (B) observa-se as curvas espectrais re-amostrada para a resolução do sensor ASTER.

A **Figura 6** ilustra áreas com distribuição de abundância mineral nas proximidades da mina (seta amarela) e no seu entorno (seta azul).

Próximo a mina, o mapa espectral delimitou áreas com alta e média abundância de caulinita, clorita e dolomita+calcita. A caulinita (**Figura 6 – A**), produto de intemperismo químico e hidrotermal, foi bem delimitada na porção nordeste, mas não foi verificada a correlação deste produto com ocorrências minerais. Na porção sul-sudoeste, foram mapeadas áreas com alta, média e baixa abundância de clorita (**Figura 6 – B**). Este mineral, também produto de alteração hidrotermal, apresentou correlação com as ocorrências de U, Cu e Au. No entanto, a compilação para determinar a abundância de turmalina (**Figura 6 – C**) necessitará de maior refino, devido à importância desse mineral.

A distribuição da abundância de dolomita+calcita apresentou alta correlação com a litologia mapeada (**Figura 6 - D**), tanto nas proximidades da mina quanto na porção sudeste. Também, ficou evidente a sua correlação com as ocorrências de U e Cu.



**Figura 6.** Resultado da classificação supervisionada por meio do método SFF.

## 6. Conclusão

Cabe, enfim, sintetizar que o produto da razão  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ , apresentou alta correlação com as ocorrências de U, Cu e Au.

O mapeamento espectral dos minerais de caulinita, clorita e a mistura dos espectros minerais dolomita+calcita apresentaram correlações com o mapa litológico em determinadas áreas e com as ocorrências minerais de U e Cu. No entanto, o mapeamento espectral realizado para a turmalina apresentou resultados vestigiais e necessitará de maior refino.

Em especial, os produtos da razão  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  e da assinatura espectral da mistura dolomita+calcita, mostram-se promissores para esta pesquisa.

Assim, o sensor ASTER revelou-se um importante instrumento nas etapas iniciais do mapeamento geológico aplicado a esse tipo de exploração mineral. Também, trabalhos futuros serão desenvolvidos com objetivo de refinar os dados, além de integrá-los com informações de maior acurácia.

## Referências Bibliográficas

- Abrams, M.; Hook, S.; Ramachandran, B. **Aster Users Handbook, Version 2**. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, USA. Disponível em: <[http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_documents/aster\\_user\\_guide\\_v2.pdf](http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_documents/aster_user_guide_v2.pdf)> Acesso em: 10.outubro.2007.
- Betts, P.G.; Giles, D.; Lister, G.S. Tectonic Environment of Shale-Hosted Massive Sulfide Pb-Zn-Ag Deposits of Proterozoic Northeastern Australia. **Economic Geology**, v.98, n.3, p. 557–576, 2003.
- Betts, P.G.; Giles, D.; Mark, G.; Lister, G.S.; Golery, B.R.; Aillères, I. Synthesis of the Proterozoic evolution of the Mount Isa Inlier. **Australian Journal of Earth Sciences**, n.53, p.185-211, 2006.
- Crósta, A.P.; Souza Filho, C.R.; Azevedo, F.; Brodie, C. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.21, p.4233–4240, 2003.
- Drury, S. A. **Image interpretation in geology**. 3ed. Inglaterra: Blackwell Science, 2001. 290 p.
- Ducart, D.F. **Caracterização da alteração hidrotermal associada às ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância**. Dissertação de mestrado. UNICAMP, 86 p., 2004.
- Heffenan, V. Uranium Exploration: A guide for the uninitiated. **Exploration Techniques. Earth Explorer**, p.12-13, 2007.
- Kwak, T.A.P.; Abeysinghe, P.B. Rare earth and uranium minerals present as daughter crystal in fluid inclusions, Mary Kathleen U-REE skarn, Queensland, Australia. **Mineralogical Magazine**, v.51, p. 665-670, 1987.
- Matheson R.S.; Searl, R.A. Mary Kathleen Uranium Deposit, Mount Isa-Cloncurry District, Queensland, Australia. **Economic Geology**, v. 51, n. 6, p. 529-540, 1956.
- Ninomiya, Y. Mapping quartz, carbonate minerals and maficultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. **Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering**, n.4710, p.191–202, 2002.
- Moon C.J. **Introduction to mineral exploration**. 2.ed. Bleckwell Publishing, 2006.
- Page, R.W. Chronology of Magmatismo, Skarn Formation, and Uranium Mineralization, Mary Kathleen, Queensland, Australia. **Economic Geology**. v.78, n.5, p.838 – 853, 1983.
- Robb, L.J. Introduction to ore-forming processes. Blackweel publishing, 2004, p. 368.
- Scott, P. Geologists warn of uranium shortage. **Nature**, v.274, n.5671, p.524, 1978.
- Souza Filho, C.R.; Tápia, C.H.; Xavier, R.P. Infrared spectroscopy ans ASTER imagery analysis of hydrothermal alteration zones at the Quellaveco porphyry-copper deposit, southern Peru. **In: ASPRS Annual Conference, 2003, Anchorag, Alaska, 2003, Anchorag, Alaska. Proceedings of the 2003 ASPRS Annual Conference. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing., 2003. v. 1. p. 1-10.**
- Souza Filho, C.R.; Tapia Calle, C.H.; Crósta, A.P.; Xavier, R.P. Infrared Spectroscopy and ASTER imagery Analysis of Hydrothermal alteration Zones at the Quellaveco Porphyry-Copper deposit, Southern Peru. **In: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2003 Annual Conference. Proceedings ...**, p. 1 – 12, 2003.
- Zhang, X.; Pazner, M.; Duke, N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). **Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 62, p. 271 – 282, 2007.