

Identificação de contaminantes por meio do processamento de imagens ASTER – Província Espinar - Peru

Amanda Lesjak Santos Teixeira¹
Gustavo Macedo de Belo Baptista²

¹Universidade de Brasília - UnB
Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte, Caixa Postal 4465, CEP 70910-900,
Brasília - DF, Brasil.
amandalesjakst@gmail.com

²Universidade de Brasília - UnB
Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte, Caixa Postal 4465, CEP 70910-900,
Brasília - DF, Brasil.
gmbaptista@unb.br

Abstract. The mines of Tintaya and Antapaccay, which belong to the mining company Xstrata Copper, are located in the region of Cusco, Peru, at the Espinar province. The commodity explored by this company is the structural copper, extracted from the minerals chalcopyrite, chalcocite and bornite. The main aim of this study is to identify regions that hold a great concentration of copper, with the purpose of locating possible new areas of extraction as well as meaning to find regions with possible contaminations caused by the mining activity. The data utilized are multispectral images from the ASTER sensor, obtained in September 28, 2000, courtesy of Université Toulouse III - Paul Sabatier. The method used throughout this work was the band ratios. This method enabled the making of two final products: the image of the studied area classified by the spectral answer of the chalcopyrite and the image of the studied area classified by the spectral answer of the bornite. In order to make a correct reading of the final products, it was used as a mineralization pattern the spectral signature present in the area surrounded by the Tintaya mine. After the final analysis of the obtained products, it was observed that the image resulted from the spectral answer of the chalcopyrite shows with better precision the shape of the regions classified as similar to the area mineralized.

Palavras chaves: Tintaya, bands ratios, copper, Tintaya, razão de bandas, cobre.

1. Introdução

A economia peruana é fortemente dependente da atividade mineira e dentre suas regiões Cusco, localizada no sul do Peru, é a detentora de um de seus principais recursos minerais. Uma das companhias mineiras que atuam nesta região é a Xstrata Copper. Esta empresa administra a extração de cobre nas minas Tintaya e Antapaccay que são as localidades analisadas no presente estudo (Figura 1). Nessas minas é extraído o metal cobre proveniente de *skarns* (Tintaya) e pórfiros (Antapaccay) localizados no limite entre as formações eocênicas e oligocênicas de Andahuaylas-Yauri (Perrello *et al.* (2003) e Carlotto *et al.* (2006). Os minerais-minérios que contém o cobre em suas estruturais são sulfetos, em geral calcopirita (CuFe_2) e bornita (Cu_5FeS_4), também podendo ser associado a calcocita (Cu_2S).

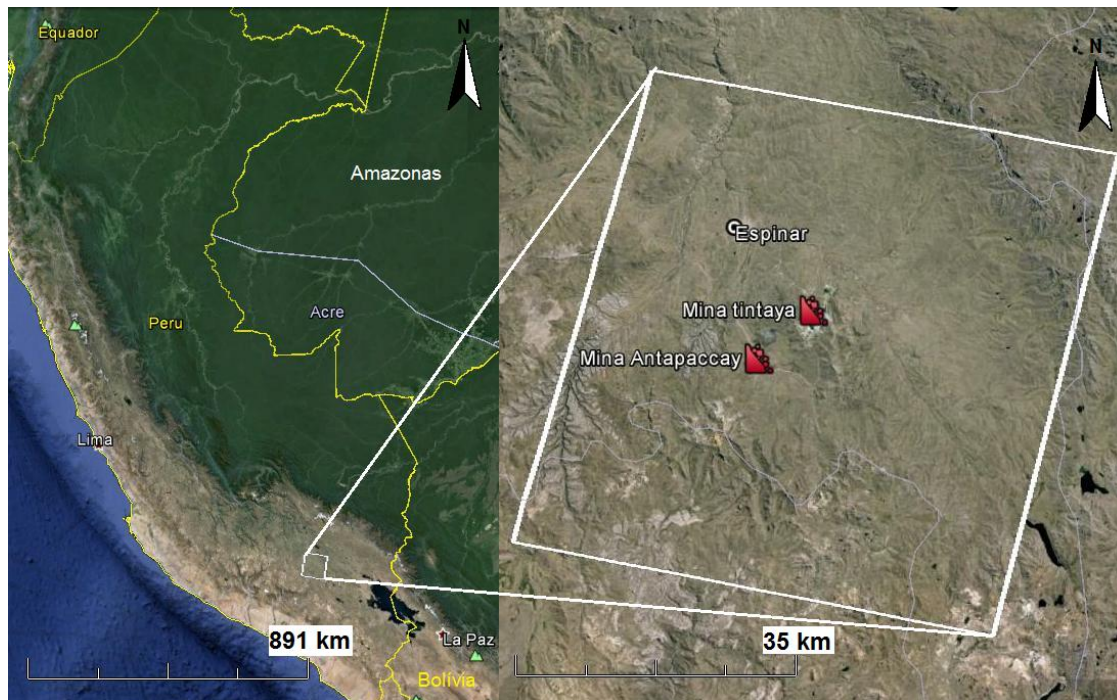


Figura 1. Imagem do satélite Landsat obtida por intermédio do *software* Google Earth onde encontra-se destacado em branco o perímetro dos dados ASTER analisados no presente estudo. Na imagem a direita foram destacadas as localizações da principal cidade da região, Espinar, e as duas mineradoras de cobre, Tintaya e Antapaccay.

De forma geral, o intuito deste trabalho é a cartografia de zonas contaminadas por resíduos de mineração por meio do processamento de dados multiespectrais. Os dados utilizados são provenientes do sensor ASTER que apresentam boa resolução espectral nos comprimentos de onda do espectro visível e boa resolução espacial.

Os dados utilizados foram imagens do sensor ASTER obtidos em 28 de setembro de 2000, cedidos pela *Université Toulouse III - Paul Sabatier*, que apresentam baixa interferência de nuvens e de ruído.

2. Contexto geológico

O distrito mineiro de Tintaya se localiza no extremo sudoeste da Cordilheira Ocidental Andina peruana. Ele se situa no limite eoceno-oligoceno da série Andahuaylas-Yauri, série esta que constitui os depósitos da bacia sedimentar datada do cretáceo inferior a superior (Carlotto *et al.* (2006). Esta bacia é composta pela formação Soraya constituída por arenitos grossos a finos, sobre esta formação se situa a formação Mara que é composta por siltitos e/ou luditos +/- calcários, avançando na estratigrafia se localiza a formação Ferrobamba constituída por calcários escuros com intercalações de siltitos +/- calcários. Esta bacia sedimentar foi afetada pela tectônica andina, datada do cretáceo superior. Esta tectônica foi dividida em duas fases deformacionais, Inca I e Inca II. A primeira fase deformacional se estende do cretáceo superior até o eoceno, já a segunda fase deformacional é datada do mioceno inferior. Entre estas duas fases deformacionais houve um aquecimento considerável da crosta que possibilitou a formação de numerosas intrusões básicas, com composição geral de dioritos granulares, onde é possível encontrar mineralizações de ferro. Pouco após o fim da fase deformacional Inca II ocorreram intrusões mais ácidas de monzonitos, granodioritos e pórfiros monzoníticos (Perrello *et al.* (2003) onde se encontram os depósitos do tipo *skarn*, rocha metassomática formada em zona de metamorfismo de contato em bordas de intrusões magmáticas ou em bordas de intrusões magmáticas onde ocorreu percolação de fluido

magmático, e de diques porfiríticos de cobre, com Mo, Ag e Au como subprodutos. Todas essas séries são recobertas em discordância pela formação Yauri composta por sedimentos lacustres datados do mioceno.

A assembléia mineralógica básica das minas Tintaya e Antapaccay é composta por bornita, calcopirita, calcocita e óxidos de cobre. Esses minerais constituem a principal fonte de cobre nos depósitos citados.

3. Metodologia de Trabalho

Nesse capítulo serão tratados os processamentos realizados nos dados brutos. O tratamento dos dados se deu em duas etapas distintas, a primeira etapa consiste no pré-processamento dos dados, isto é, contém todas as etapas essenciais para a utilização das imagens ASTER. Já a segunda bateria de processamentos compreende os tratamentos realizados com o intuito de classificação geológica da região estudada.

3.1. Pré-processamento

Na etapa inicial do processamento dos dados, foi realizado, em ordem cronológica, o georreferenciamento das imagens, a mudança do tamanho do pixel de certas bandas do sensor e a confecção de uma única imagem contendo as 14 bandas do dispositivo ASTER.

Para realizar o georreferenciamento foram utilizadas as informações GPS disponibilizadas em arquivo de texto em conjunto com as imagens do levantamento. A mudança do tamanho do pixel foi necessária devido à diferença de resolução espacial entre os grupos de bandas do sensor. Nesta etapa todas as 14 bandas da imagem foram adequadas a uma resolução espacial de 15 m, semelhante à resolução das bandas do grupo VNIR. O último passo desta etapa foi realizado por meio do processo de fusão de bandas e consiste na confecção de uma única imagem multiespectra contendo as informações das 14 bandas do sensor ASTER.

3.2. Processamento - Classificação Geológica

A segunda etapa de processamento dos dados teve como intuito a classificação geológica das imagens, para isso foi realizada a razão de bandas após a análise da resposta espectral dos minerais associados à mineração.

Para realizar a razão de bandas é necessário analisar a resposta espectral de cada substância visada. No caso deste estudo, os materiais estudados foram os três minerais-minérios das minas Tintaya e Antapaccay, calcopirita (CuFeS_2), calcocita (Cu_2S) e bornita (Cu_5FeS_4). Os índices utilizados foram 3/1 e 1/4 que representam a razão entre as bandas 3 e 1 e 1 e 4 do sensor ASTER.

3.3. Materiais

As imagens utilizadas neste trabalho foram obtidas pelo sensor multiespectral ASTER, este tipo de imagem contém 14 bandas com informações provenientes de diferentes comprimentos de onda (λ) (Figura 2) e uma banda oblíqua (3B).

As bandas deste sensor compreendem o intervalo do espectro eletromagnético do visível ao infravermelho térmico, isto indica que este dispositivo capta imagens dentro do intervalo espectral de aproximadamente 0,4 μm a 1 mm. Estas bandas são agrupadas em três grupos distintos (Figura 2), o VNIR (visível e infravermelho próximo) que contém as três primeiras bandas, o SWIR (infravermelho próximo e médio) que contém seis bandas, as bandas 4 a 9, e finalmente o TIR (infravermelho termal) que contém as cinco últimas bandas do ASTER. A resolução espacial e radiométrica das bandas mudam de acordo com o grupo que elas estão inseridas. Para o VNIR a resolução espacial é de 15 metros e a resolução radiométrica de 8 bits/pixel, para o SWIR a resolução espacial muda para 30 metros e a resolução radiométrica se mantém e, por fim, para o TIR a resolução espacial é de 90 metros e a resolução

radiométrica é de 12 bits/pixel (Meneses e Almeida (2012).

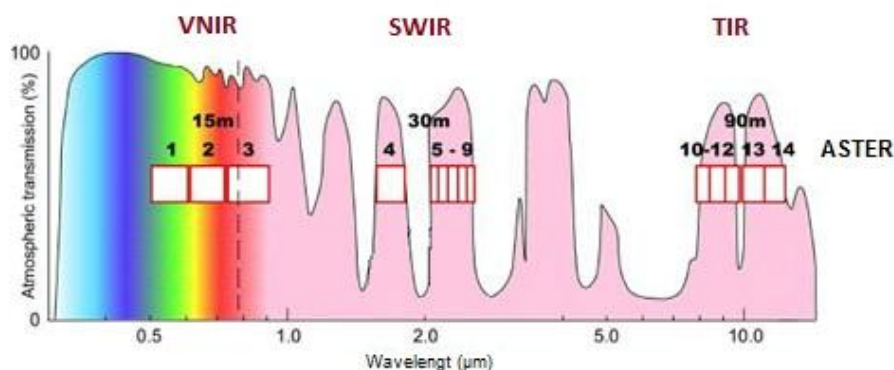


Figura 2. Representação do espectro eletromagnético e seus subgrupos. Os retângulos brancos representam a localização dentro do espectro eletromagnético das bandas do sensor ASTER. Imagem adaptada do site <geo.unizh> acessado em 19 de maio de 2015.

Os dados iniciais são constituídos por dois tipos de arquivos, as imagens propriamente ditas e as informações técnicas das imagens, como a data de aquisição, as coordenadas geográficas do polígono das imagens, o tipo de sensor, etc.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados alcançados ao longo do presente estudo. No tópico 4.1 se encontram os resultados obtidos após os processamentos realizados visando à identificação das regiões ricas em cobre e regiões passíveis de contaminação devido à atividade mineira local.

4.1. Classificação Geológica

Ao fim do processamento dos dados chegou-se a dois tipos de classificações geológicas diferentes ilustradas nas figuras 4 e 5. A figura 3 é uma composição RGB 321 sem qualquer processamento visando à classificação geológica e será usada como imagem de referência. Nesta imagem (Figura 3) os locais onde há cobertura vegetal são representados em vermelho, as minas desta região apresentam resposta azul claro como é possível observar no ponto destacado da imagem que representa a maior frente de lavra da região, a mina Tintaya. O padrão de resposta das localidades mineiras foi usado como referência para a identificação de outras regiões que possam apresentar composição semelhante.

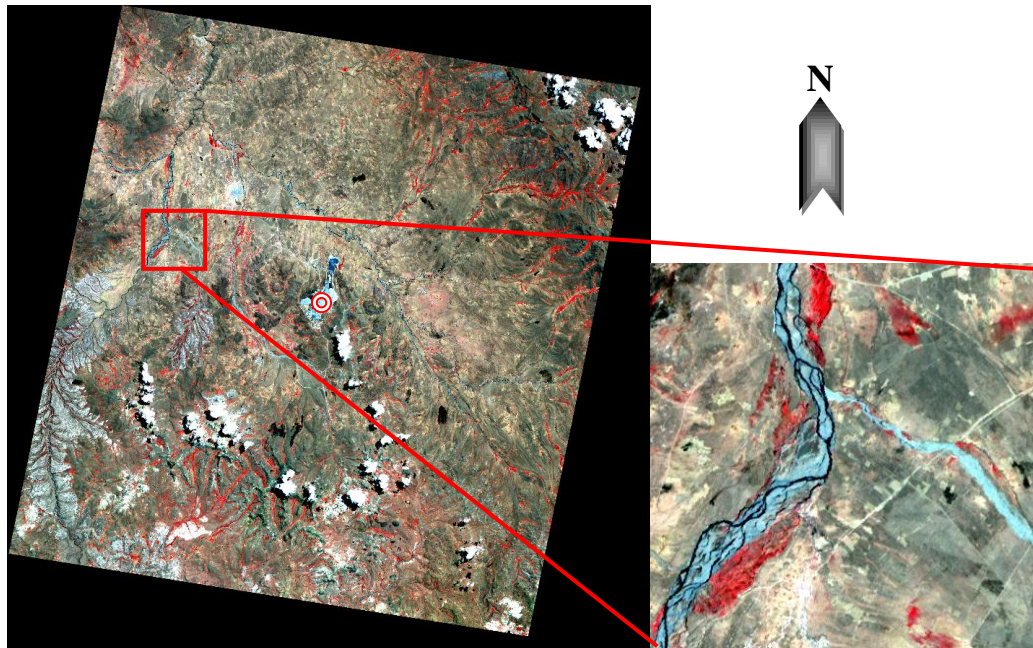


Figura 3. Imagem do sensor ASTER em composição RGB, do ingles Red (vermelho), Green (verde) e Blue (azul), onde a banda 3 encontra-se no canal do vermelho, a banda 2 está no canal do verde e a banda 1 no canal do azul. Nesta composição a vegetação é representada em vermelho, corpos d'água em preto e os sedimentos ricos em cobre em azul claro. O ponto destacado nesta imagem representa a localização da mina Tintaya.

As figuras 4 e 5 são os resultados obtidos pelo método razão de bandas. Na figura 4 o mineral destacado foi a bornita (todas as regiões em vermelho). O índice utilizado para isto foi $1/4$. Entretanto, como é possível observar ao se fazer a comparação entre as figuras 3 e 4 a precisão desta classificação não é muito elevada. Comparando o zoom da composição RGB 321 (Figura 3) é possível identificar que após a classificação não é mais possível delimitar precisamente os canais das drenagens presentes na região de estudo.

O índice aplicado para realizar a classificação da imagem 5 foi $3/1$ que foi capaz de destacar bem o mineral calcopirita (todas as regiões em azul). Esta classificação, em oposição a anterior, resultou em uma boa precisão das feições vistas na composição RGB, destacada na comparação entre os zooms das figuras 3 e 5. Ainda na imagem classificada com o índice $3/1$ também foi possível ressaltar a cobertura vegetal representada em vermelho na figura 5.

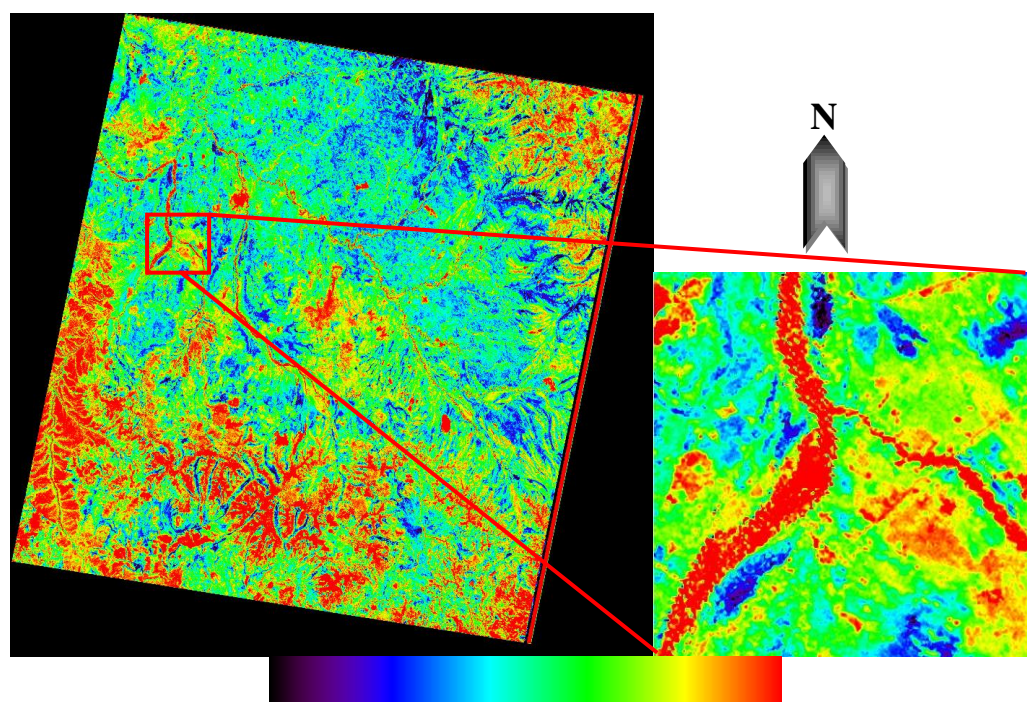


Figura 4. Classificação feita por meio do método razão de bandas com o índice 1/4. Nesta imagem as altas concentrações de bornita são representadas em vermelho, as baixas concentrações deste mineral são representadas em preto e valores intermediarios são representados pelas cores contidas na escala relativa encontrada abaixo da imagem classificada.

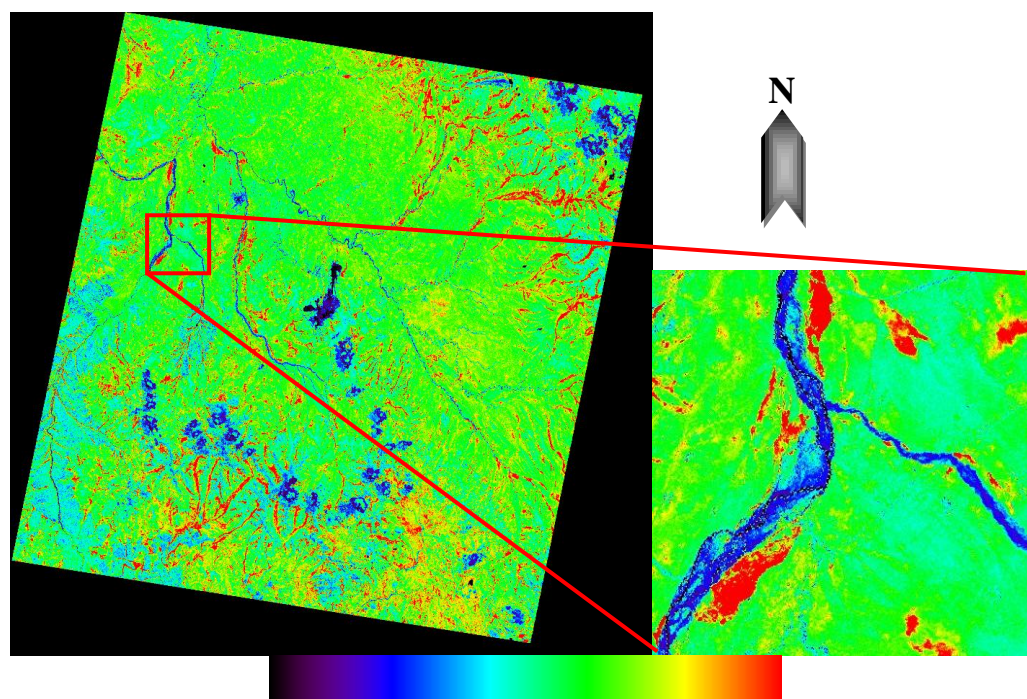


Figura 5. Classificação feita por meio do método razão de bandas com o índice 3/1. Nesta imagem as altas concentrações de calcopirita são representadas em azul, as regiões representadas em vermelho indicam presença de vegetação. A escala relativa desta figura indica a variação das respostas onde a cor preta representa as respostas mais baixas e a cor vermelha representa as respostas mais altas.

Para realizar a escolha dos índices utilizados foi feito um estudo prévio das curvas de resposta espectral de cada mineral-minério das minas da região. As curvas utilizadas estão disponíveis na biblioteca espectral do *software* ENVI, utilizado em todas as etapas do processamento dos dados. As bandas escolhidas para os índices deste método foram as que apresentam a maior variação no espectro eletromagnético, isto é, as bandas com as respostas máxima e mínima de cada mineral. Os espectros eletromagnéticos dos minerais bornita, calcopirita e calcocita encontram-se representados na figura 6.

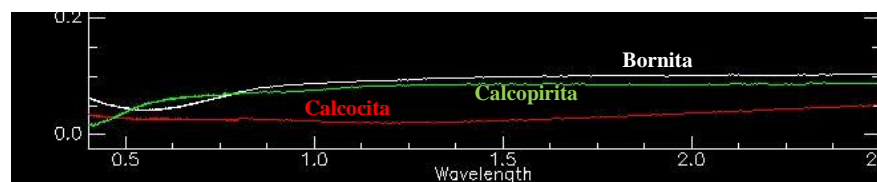


Figura 6. Gráfico contendo as respostas espectrais dos três minerais de cobre explorados pelas minas Tintaya e Antapaccay. A curva vermelha representa as respostas espectrais do mineral calcocita, como a resposta deste mineral é bem constante ao longo do espectro eletromagnético ele não foi considerado para o método razão de bandas. A curva em verde representa a resposta espectral do mineral calcopirita, a resposta mais baixa desse mineral esta localizada no comprimento de onda referente a banda 1 e a resposta mais alta se localiza no comprimento de onda da banda 3. A curva branca representa a resposta espectral do mineral bornita, a banda 1 está localizada no comprimento de onda com resposta mais baixa e a banda 4 apresenta a resposta mais alta para este mineral.

4.2. Discussão

Como descrito no tópico anterior, foram obtidos dois produtos de classificação geológica. Neste tópico será discutida a diferença entre os dois resultados alcançados pelo método de razão de bandas

Os dois produtos obtidos pelo método de razão de bandas (Figura 4 e 5) apresentam de forma geral a mesma resposta, porém analisando de forma mais minuciosa esses resultados é visível que na imagem onde foi realizado o destaque do mineral bornita (Figura 4) os limites dos corpos hídricos contidos na imagem são menos precisos se comparados com a figura 5 onde foi realizado o realce do mineral calcopirita. Este fenômeno pode indicar duas situações distintas. Considerando o quadro menos favorável esta resposta indicaria que a razão determinada resultou em uma confusão onde o método não pode distinguir lâminas d'água e presença de bornita. A outra possibilidade de interpretação para o resultado obtido é considerar que este índice foi eficaz ao identificar contaminação em estado líquido, ou seja, os cursos de drenagens que apresentam a mesma resposta esperada para a bornita na figura 4 seriam porções onde a água desses rios foi contaminada pela atividade mineira de região. Ambas as interpretações necessitam de dados de campo para serem validadas, dados não disponíveis para o presente estudo.

5. Conclusão

A partir dos anos 2000, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto como uma ferramenta para o mapeamento e cartografia geológica vem se intensificando bastante. As técnicas de processamento e interpretação das imagens multiespectrais são utilizadas antes dos levantamentos de campo com o intuito de determinar melhor as áreas onde realmente necessita-se de estudos *in situ*, tornando assim a etapa de campo mais precisa.

Ao fim deste trabalho, foi possível observar que os objetivos propostos inicialmente foram realizados. O método utilizado para identificar as regiões onde se encontram altas concentrações de minerais associados ao cobre geraram resultados coerentes entre si.

Entretanto, devido à falta de dados de campo não foi possível realizar a comparação entre os resultados obtidos com o intermédio do processamento dos dados do sensor ASTER com dados de levantamentos terrestres para assim validar o modelo gerado.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao governo brasileiro que, por meio do programa Ciências Sem Fronteiras, com apoio financeiro da CAPES, possibilitou que a primeira autora cursasse durante um ano o curso de mestrado em geociências da *Université Paul Sabatier*, onde as formações contidas nesse artigo foram processadas.

Referências Bibliográficas

ABOUT ASTER. Disponível em <<http://www.geo.unizh.ch/~kaeaeb/glims/glims.html>>. Acesso em: 19.mai.2015.

ASTER GDEM. Disponível em <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/important_notice.jsp>. Acesso em: 27.abr.2015.

Carlotto, V., Carlier, G., Quispe, J., Astete, D. **Control Estructural de los Pórfidos Eoceno-Oligoceno del Cinturón Andahuaylas-Yauri (Sur Perú) y su relación con la Cordillera de Domeyko (Norte de Chili).** XII Congreso Peruano de Geología. Resumen extendido, 2006.

GEOCONSUL S.A.. **Estudio de suelos, pavimentos, geologie y geotecnia del estudio definitivo del proyecto : "Mejoramiento de la carretera : Patahuasi-Yauri-Sicuani, Tramo : Espinar-El descanso 42.90km"**. 2006.

Levit, Stuart M.. **Glencore Xstrata's Epinar province mines : Cumulative impacts to human health and the environment.** 2013.

Magazine Latino Minería. Edição número 73, outubro-dezembro 2011.

MENESES, Paulo Roberto, ALMEIDA, Tati de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Brasília, Brasil, 2012.

Neyra, Arturo Fausto Maldonado. **Caracterização das estruturas geológicas e estimativas da resistência ao cisalhamento das descontinuidades na mineração de cobre de Tintaya, Perú.** Tese de mestrado Universidade de Brasília, Brasil, 2006.

Perelló, J., Carlotto, V., Zarate, A., Ramos, P., Posso, H., Neyre, C., Caballero, A., Fuster, N., Muhr, R. **Porphyry-style Alteration and mineralization of the Middle Eocene-Early-Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru.** Economic Geology, volume 98, 2003.

Perrotta, Mônica Mazzini. **Processamento digital básico de imagens de sensores remotos ópticos para uso em mapeamento geológico programa ENVI.** 2005.

SÁEZ, Fernando. **Modelo geológico conceptual del molibdênio, Mina Tintaya sur del Peru.** 2010.

Souza, Jorge Batista de. **Sensoriamento Remoto da Vegetação.** PUC Minas, Especialização em Geoprocessamento, 2010.