

Caracterização espectral quantitativa do minério de ferro na Mina N4, Província Mineral de Carajás, a partir de imagens Landsat 8 e Hyperion

Diego Fernando Ducart¹
Adalene Moreira Silva¹
Catarina Labouré Bemfica Toledo¹
Luciano Mozer De Assis²
Elias Martins Guerra Prado^{1,3}

¹ Universidade de Brasília - UnB
CEP 70910-900 – Brasília - DF, Brasil
{diegoducart, adalene, catarinatoledo}@unb.br

² Exploração Mineral de Ferrosos, Vale S.A.
CTF - Miguelão, Fazenda Rio de Peixe, s/nº, Nova Lima-MG, CEP: 34.000-000
Luciano.assis@vale.com

³ Serviço Geológico do Brasil - CPRM
CEP 78904-300 – Porto Velho - RO, Brasil
Elias.prado@cprm.gov.br

Abstract. Mapping of iron oxide in N4 mine, Carajás Mineral Province, Brazil, was achieved using Landsat 8 and Hyperion images. The following Landsat pre-processing was applied: (1) data format conversion, (2) radiance correction, and (3) FLAASH atmospheric correction. The following pre-processing was applied on Hyperion image: (1) data format conversion, (2) radiance correction, (3) interpolating over bad detector elements, (4) striping reducing, (5) FLAASH atmospheric correction, (6) EFFORT polishing on visible and near infrared spectral bands, and (7) mask generation on problem pixel. Based on the depth and wavelength of the 900 nm absorption feature, quantitative spectral indices were produced with Landsat and Hyperion images. The absorption depth of 900 nm found in iron oxides is commonly proportional to ferric iron content. The wavelength of this absorption is related to the proportion between hematite and goethite. The spectral indices were calculated on continuum-removed reflectance image data. A spectral index to calculate the depth of band 5 absorption was applied in Landsat 8. Ferric iron abundance and hematite-goethite ratio spectral indices were generated from Hyperion. Ferric abundance indices calculated from Landsat and Hyperion are positively correlated. High magnetic anomalies are correlated with high ferric abundance and hematite composition. Hematite mapped with Hyperion is also associated with high geochemical iron content.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, Landsat 8, Hyperion, iron ore, sensoriamento remoto, processamento de imagens, Landsat 8, Hyperion, minério de ferro.

1. Introdução

A Província Mineral de Carajás apresenta depósitos de classe mundial de minério de ferro. Os depósitos possuem teores maiores que 64% de Fe e reservas de 17,3 bilhões de toneladas (Zucchetti, 2007). Os depósitos de ferro de Carajás inserem-se na seqüência metavulcanossedimentar arqueana do Grupo Grão Pará, Supergrupo Itacaiúnas. Jaspilitos e minérios de alto teor de Fe compõem a denominada Formação Carajás, sobreposta e sotoposta por rochas máficas. No distrito mineiro da Serra Norte, encontram-se as minas a céu aberto N4 e N5, além dos depósitos N1 a N3 e N6 a N9 (Fig. 1A, B). O potencial do mineral de ferro brasileiro é expressivo, mas para manter um crescimento sustentável da produção ainda precisa-se pesquisar mais em geotecnologias que permitam caracterizações rápidas do minério, permitindo uma melhor definição dos modelos geológicos e exploratórios.

A espectrorradiometria de reflectância e o sensoriamento remoto podem ajudar na caracterização da geologia do minério de ferro, como assim também na definição de modelos

exploratórios (Haest et al., 2012; Murphy e Monteiro, 2013). No entanto, este tipo de ferramentas tem sido pouco explorado quando comparado com outras commodities.

A extração de informação mineral quantitativa a partir de dados de espectrômetros de resolução espectral muito alta tem sido aplicada com sucesso por Haest et al. (2012). Este tipo de extração de informação também foi testado com dados de sensores remotos hiperespectrais, tais como AVIRIS, HYMAP e Hyperion (Cudahy et al., 2008; Laukamp et al., 2011). Neste trabalho, se apresentam resultados preliminares da extração de informação mineral quantitativa a partir de imagens Landsat 8 e Hyperion para a caracterização mineral em áreas da mina de ferro N4, Província Mineral de Carajás, Pará.

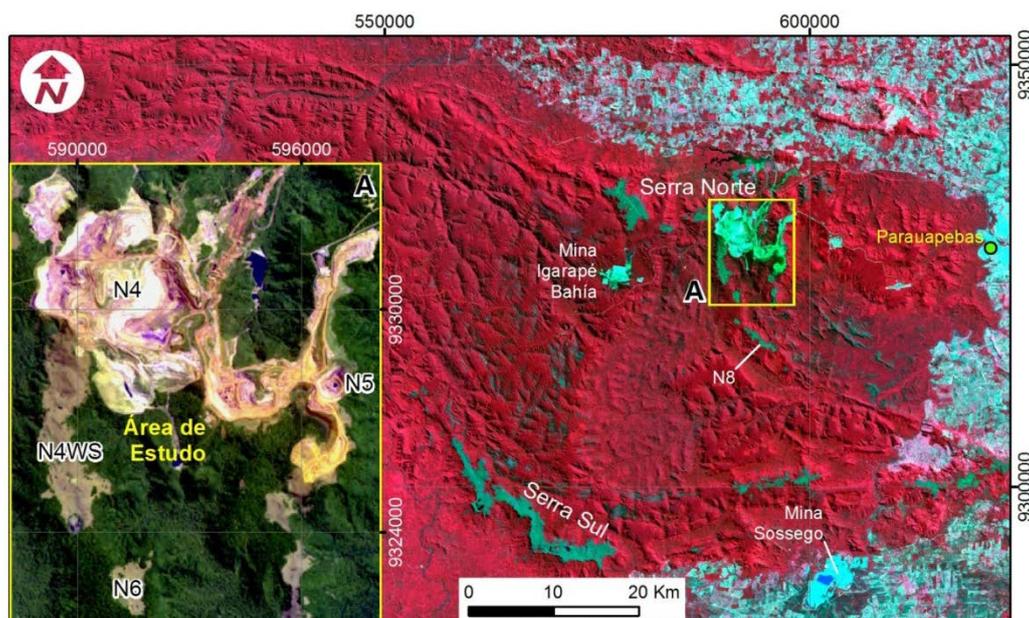


Figura 1. Composição colorida RGB-432 do Landsat 8 mostrando a localização regional da área de estudo dentro da Província Mineral de Carajás, Pará. A. Composição colorida RGB-762 do Landsat 8 mostrando uma aproximação à área de estudo.

2. Métodos

2.1. Pre-processamento do Landsat 8

O Landsat 8 foi lançado em fevereiro de 2013, com melhoras técnicas notáveis comparadas com os anteriores sensores do mesmo programa. Este sensor incorpora um aumento na fidelidade geométrica, na resolução radiométrica e na razão sinal/ruído (SNR; Iron et al., 2012). O Landsat 8 possui 5 bandas no visível e infravermelho próximo (VNIR) e 2 bandas no infravermelho de ondas curtas (SWIR), todas com resolução espacial de 30 m, além de uma banda pancromática de 15 m. A imagem da área de estudo com data de aquisição do 3 de agosto de 2013 foi obtida gratuitamente do sitio <http://glovis.usgs.gov/>, e pre-processada de acordo com os seguintes passos: (1) conversão do formato GeoTiff para o formato padrão do Envi, (2) conversão para radiância utilizando o Envi 5.1, e (3) correção atmosférica utilizando o módulo FLAASH.

2.2. Pre-processamento do Hyperion

Hyperion é um dos três sensores a bordo do satélite EO-1 lançado no ano 2000. O Hyperion é um sensor hiperespectral de varredura tipo eletrônica (pushbroom) que opera em uma órbita de 705 km de altitude (a mesma do Landsat e do ASTER) imageando 256 pixels na direção perpendicular à órbita do satélite, correspondentes a uma faixa no terreno com largura de 7,5 km. Ele captura radiação refletida na região espectral do VNIR e SWIR (400-2400 nm) em 242 bandas de 30 m de resolução espacial (Barry, 2001).

Das 242 bandas originais do Hyperion, somente 155 bandas estão calibradas e correspondem a comprimentos de onda não superpostos e sem intensa absorção do vapor de água atmosférico (Bandas 8-57, 79, 83-119, 133-164, 183-184, 188-220). A imagem Hyperion do nível L1R, com data de aquisição de 26 de Julho de 2009, foi obtida gratuitamente do site <http://glovis.usgs.gov/>.

O pre-processamento efetuado segue os seguintes passos: (1) conversão do formato de dados original HDF para o formato padrão do ENVI utilizando o módulo "hyperion_tools", (2) conversão para radiância, (3) correção dos pixels defeituosos, (4) correção do *striping*, (5) correção atmosférica, (6) suavização dos espectros da imagem, e (7) construção de máscara.

Pixels com valores de radiância anômalos foram corrigidos por meio da ferramenta "Pushbroom Plugger" do módulo MMTG/A-List (Mason, 2002), a qual substitui os pixels defeituosos por outros resultantes da interpolação dos pixels vizinhos. O problema de listras verticais ou *striping* que aparecem nas bandas do VNIR e SWIR, comum a todos os sensores de varredura tipo eletrônico (pushbroom), foi corrigido utilizando a ferramenta "Pushbroom Destriper" do módulo MMTG. Para avaliar os resultados foi aplicada a aritmética de bandas do SWIR da Equação 1. Os resultados mostraram uma notável diminuição do *striping* (Fig. 2B) com relação à imagem original.

$$\frac{(\text{banda } 2194 \text{ nm} + \text{banda } 2214 \text{ nm})}{\text{banda } 2254 \text{ nm}} \quad (1)$$

A correção atmosférica da imagem foi realizada por meio do módulo FLAASH, o qual utiliza códigos de transferência radiativa do MODTRAN-4. Este módulo também corrigiu o efeito *smile* (Fig. 2C, D), problema comumente encontrado no Hyperion. Este efeito é devido a um deslocamento do comprimento de onda central do pixel na direção através da linha de imageamento (*cross-track*), o qual resulta da curvatura da fenda de entrada da imagem no detector (Goodenough et al., 2003). Este efeito pode ser detectado por meio da utilização da primeira banda da transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF), onde se observa um gradiente anormal no brilho. A correção atmosférica geralmente diminui a razão sinal/ruído (SNR) nos dados devido à incorporação de ruídos residuais sistemáticos nos espectros da imagem e também devido à introdução de efeitos espectrais provocados por diferenças entre o modelo atmosférico utilizado e a atmosfera real. Estes ruídos foram diminuídos por meio da ferramenta "EFFORT polishing" (*empirical flat field optimal reflectance transformation*), presente no módulo MMTG. Esta correção foi aplicada em 74 bandas do VNIR, localizadas entre 426 a 1275 nm. Os resultados mostraram que os espectros de reflectância derivados da imagem corrigida com EFFORT apresentam uma diminuição destes ruídos, porém sem sua completa eliminação.

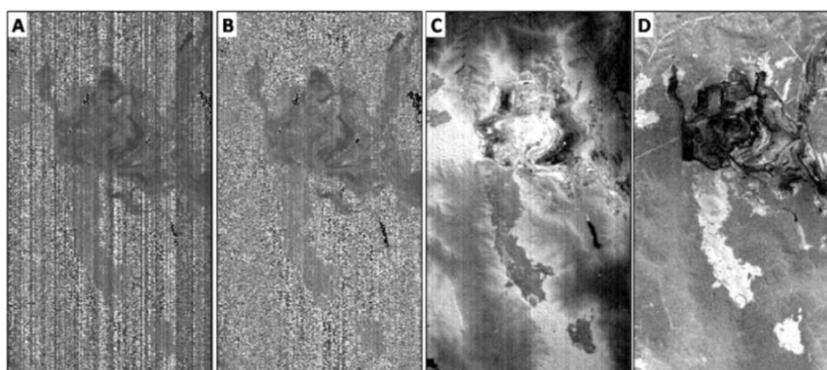


Figura 2. A. Imagem resultante da aritmética de bandas da Equação 1 mostrando o problema do *striping*. B. Resultado da mesma aritmética de bandas aplicada na imagem com correção de *striping*. C. Primeira banda de MNF aplicado na imagem original do Hyperion mostrando o efeito de *smile* e *striping*. D. Primeira banda do processamento MNF na imagem corrigida atmosféricamente com FLAASH mostrando a diminuição dos problemas.

Os ruídos residuais não-correlacionados não são geralmente reduzidos pelo método de suavização dos espectros mencionado anteriormente. Estes ruídos são observados nos espectros como picos anormalmente altos ou *spikes* e podem provocar efeitos indesejáveis nas etapas posteriores de processamento. Para evitar estes problemas, foi criada uma máscara para ser aplicada no processamento posterior.

2.3. Parâmetros Espectrais

Processos de transição eletrônica e transferência de carga (ex. mudança no estado eletrônico de elétrons ligados a átomos ou moléculas) associados a íons de metais de transição como Fe, Ti, Cr, etc., determinam, em grande parte, a posição das feições diagnósticas de absorção dos espectros de alguns minerais nas regiões do VNIR e SWIR (Hunt, 1977). A posição, forma e profundidade destas feições de absorção são controladas pela estrutura cristalina em que estes átomos e moléculas absorventes se encontram, e pela estrutura química do material.

Goethita e hematita apresentam absorção de campo cristalino entre 630-715 nm e 850-1000 nm e uma feição de absorção devida a transferência de cargas entre 480-550 nm (Fig. 3; Curtiss, 1985). Hunt e Ashley (1979) observaram que a abundância de (hidro-)óxidos de ferro está relacionada à profundidade da absorção gerada pelo campo cristalino entre 850-1000 nm. A posição da feição de absorção entre 850-1000 nm é função de sua composição (Townsend, 1987), variando entre ~860 nm para hematita pura e ~920 nm para goethita pura (Fig. 3).

A profundidade da feição de absorção é um indicador da quantidade do material presente na amostra causando a absorção (van der Meer, 2004). Esta profundidade também está relacionada ao tamanho de partícula ou cristal. A posição da feição de absorção é definida como o comprimento de onda em que feição de absorção chega ao mínimo de reflectância. Variações na posição de certas absorções estão relacionadas a variações na composição mineralógica e química de alguns minerais (Adams, 1975).

O procedimento para extração de informação mineral está baseado na medição da profundidade, comprimento de onda e geometria de feições espectrais de absorção. Estas variáveis geométricas das curvas espectrais podem ser quantificadas na forma de parâmetros espectrais. Os parâmetros espectrais são geralmente obtidos do espectro de reflectância removido do contínuo (Fig. 3). Os valores da profundidade variam entre 0 (ausência do mineral) e 1 (máxima abundância). Os valores da posição da feição de absorção são normalmente expressos em valores de comprimentos de onda. Neste trabalho, a ferramenta "Spectral Indices" do MMTG foi utilizada para a extração dos parâmetros espectrais nas imagens Landsat 8 e Hyperion. Os parâmetros e algoritmos utilizados foram baseados no trabalho de Cudahy et al. (2008) e são apresentados na Tabela 1.

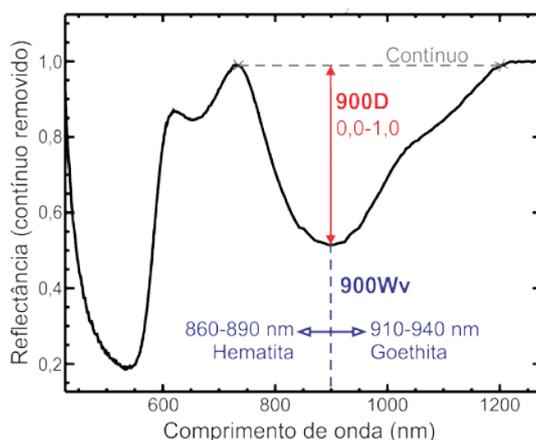


Figura 3: Representação esquemática dos parâmetros espectrais de profundidade e comprimento de onda da absorção de 900 nm relacionada a óxidos de ferro (hematita e goethita)

Os resultados dos parâmetros espectrais foram comparados com dados aerogeofísicos e geoquímicos. A imagem geofísica utilizada corresponde à componente T_{ZZ} do gradiente gravimétrico, obtido a partir do aerolevantamento 3D-FTG que recobre a área de estudo. O sistema 3D-FTG é uma plataforma móvel, inserida numa cápsula aeronáutica e é composto por 12 acelerômetros, dispostos igualmente em 3 instrumentos de gradiente da gravidade (IGG) que medem as 5 componentes independentes do gradiente da gravidade, T_{xy} , T_{xz} , T_{yz} , T_{zz} , T_{xx} ou T_{yy} e, representando a taxa de variação das componentes G_x , G_y e G_z , que por sua vez, representam a aceleração da gravidade ao longo dos eixos cartesianos (Murphy, 2004). A componente T_{zz} realça corpos anômalos densos e, nesse caso, ricos em hematita (Assis, 2013). Os dados geoquímicos utilizados correspondem a os primeiros 5 metros das sondagens realizadas na área.

Tabela 1. Parâmetros espectrais gerados neste estudo para extrair informação mineral das imagens Landsat 8 e Hyperion (baseados em Cudahy et al., 2008)

<i>Imagem</i>	<i>Produto</i>	<i>Função</i>	<i>Algoritmo base</i>	<i>Detalhe do algoritmo</i>	<i>Filtro/máscara</i>
Landsat 8	Fe ⁺³ abund	Abundância de óxido férrico (hematita, goethita)	900D _{Land}	Profundidade normalizada da absorção de 865 nm (banda 5), calculada usando polinômio de segunda ordem entre 655 nm (banda 4) e 1609 nm (banda 6)	Valor > 0,1
Hyperion	Fe ⁺³ abund	Abundância de óxido férrico (hematita, goethita)	900D _{Hyp}	Profundidade normalizada da absorção de 900 nm, calculada a partir de polinômio de terceira ordem ajustado a curva de reflectância removida do contínuo entre 750 e 1250 nm, com foco entre 800 e 1020 nm	Valor > 0,1
	Hem-Goet ratio	Proporção de hematita e goethita	900W _{VHyp}	Comprimento de onda da máxima absorção de 900 nm, calculado a partir de um polinômio de terceira ordem ajustado a curva de reflectância removida do contínuo entre 750 e 1200 nm, com foco entre 800-1050 nm.	Fe ⁺³ abund > 0,1 900W _{VHyp} entre 860 e 950

3. Resultados e Discussão

Os resultados da extração de parâmetros espectrais para as imagens Landsat 8 e Hyperion se apresentam nas Figuras 4 e 5, respectivamente. A área da mina N4, por estar desmatada, facilita a aplicação dos processamentos para geração de parâmetros espectrais. O parâmetro de abundância de Fe⁺³ gerado a partir da imagem Landsat 8 mostra algumas zonas com maiores valores no oeste como também no sudeste (Fig. 4A, B, C, E). Os espectros da imagem associados a estas zonas podem ser correlacionados diretamente com espectros de referência de hematita e goethita da biblioteca espectral do USGS (Figura 4D). No entanto, diferenças entre estes dois minerais se apresentam principalmente na inclinação da curva entre as bandas 2 e 4, o qual dificulta a sua identificação por meio de este sensor.

O resultado do parâmetro de abundância de Fe⁺³ aplicado na imagem Hyperion apresenta alta correlação com relação ao do Landsat 8 (Fig. 5A). Os espectros da imagem Hyperion associados às zonas com maior abundância de Fe⁺³ mostram claramente um aumento na profundidade da absorção de 900 nm. Os resultados do parâmetro da composição de hematita-goethita (Hem-Goet ratio) podem ser corroborados com os espectros dos pixels associados às zonas com valores extremos de composição (P.1 e P.2 da Fig. 5B, D). A posição e forma da absorção de 900 nm podem ser comparadas com aquelas da hematita e goethita da biblioteca espectral do USGS (Fig. 5D).

As anomalias positivas da imagem geofísica da componente T_{ZZ} que realça corpos anômalos densos ricos em hematita se correlacionam com as zonas de maior abundância de

Fe⁺³ e de composição hematítica mapeadas com parâmetros espectrais na Hyperion (Fig. 5C). Os valores geoquímicos de Fe também se correlacionam positivamente com os dados espectrais (Fig. 5E).

4. Conclusões

Os resultados de este trabalho mostram que a profundidade de absorção associada à banda 5 do Landsat 8 como assim também da absorção de 900 nm da Hyperion pode ser utilizada para estimar rapidamente a abundância relativa de Fe⁺³. A imagem Hyperion, apesar de conter vários tipos de problemas, mostrou resultados muito satisfatórios tanto no mapeamento da abundância como assim também da composição dos óxidos de ferro. Este estudo mostra que parâmetros espectrais extraídos de imagens Landsat 8 e Hyperion podem dar apoio no mapeamento do minério de ferro em lavras e minas. A correlação com a componente gravimétrica *T_{zz}*, que mapeia corpos anômalos em hematita, reforça essa assertiva.

5. Referências Bibliográficas

Adams, J.B. Interpretation of visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes and other rock forming minerals. In: Karr, C. (Ed.). **Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial Materials**. Academic Press, New York, 1975. p. 91–116.

Assis, L.M. **Geração de Modelo Exploratório para o Minério de Ferro da Província Mineral de Carajás Através da Integração de Dados Multifonte**. Dissertação de Mestrado, UnB, 154 p., 2013.

Cudahy, T.; Jones, M.; Thomas, M.; Laukamp, C.; Caccetta, M.; Hewson, R.; Rodger, A.; Verrall, M. **Next generation mineral mapping- Queensland Airborne HyMap and Satellite ASTER surveys 2006–2008**. Perth. Disponível em: <<http://c3dmm.csiro.au/NGMM/>>, CSIRO Exploration and Mining, 2008, 152 p. (Report P2007/364).

Goodenough, D.G.; Dyk, A.; Niemann, K.O.; Pearlman, J.S.; Chen, H.; Han, T.; Murdoch, M.; West, C. Processing Hyperion and ALI for Forest Classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1321-1331, 2003.

Haest, M.; Cudahy, T.; Laukamp, C.; Gregory, S. Quantitative Mineralogy from Infrared Spectroscopic Data. I. Validation of Mineral Abundance and Composition Scripts at the Rocklea Channel Iron Deposit in Western Australia. **Economic Geology**, v. 107, p. 209-228, 2012.

Hunt, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near-infrared. **Geophysics**, v. 42, p. 501–513, 1977.

Hunt, G.R.; Ashley, R.P. Spectra of altered rocks in the visible and near-infrared. **Economic Geology**, v. 74, p. 1613–1629, 1979.

Irons, J.R.; Dwyer, J.L.; Barsi, J.A. The next Landsat satellite- The Landsat Data Continuity Mission. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 11–21, 2012.

Laukamp, C.; Cudahy, T.; Cleverley, J.S.; Oliver, N.H.S.; Hewson, R. Airborne hyperspectral imaging of hydrothermal alteration zones in granitoids of the Eastern Fold Belt (Mount Isa Inlier, Australia). **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 11, p. 3–24, 2011.

Mason, P. **MMTG A-List Hyperspectral Data Processing Software**. CSIRO, Division of Exploration and Mining, Sydney, Australia. 2002. 103 p.

Murphy, C.A. The Air-FTG[®] airborne gravity gradiometer system. In R.J. Lane, editor, Airborne Gravity 2004 – **Anais do ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop: Geoscience Australia Record**. v. 18, p. 7-14, 2004.

Murphy, R.E; Monteiro, S. Mapping the distribution of ferric iron minerals on a vertical mine face using derivative analysis of hyperspectral imagery (430-970 nm). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 75, p. 29-39, 2013.

Townsend, T.E. Discrimination of iron alteration minerals in visible and near-infrared reflectance data. **Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets**, v. 92, p. 1441–1454, 1987.

Van der Meer, F. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.5, n. 1, p. 55– 68, 2004.

Zucchetti, M. Rochas máficas do grupo Grão-Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás, PA. 2007. Belo Horizonte. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, UFMG, 2007.

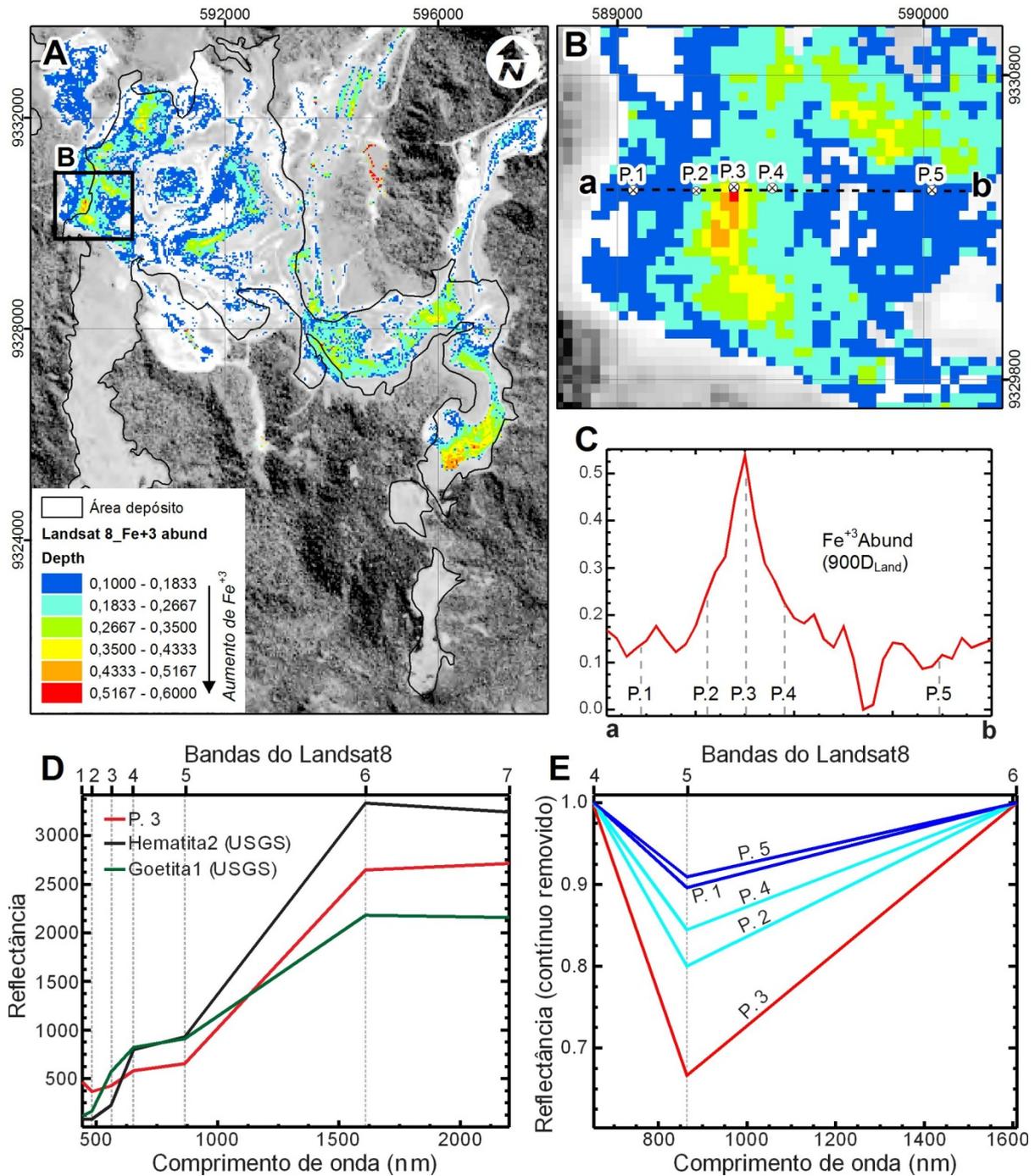


Figura 4. A. Resultado do processamento para a determinação do parâmetro espectral de abundância de Fe^{+3} (Fe^{+3} abund) na imagem Landsat 8. B. Aproximação da área A, mostrando linha de perfil a-b. C. Perfil a-b com valores do parâmetro espectral. D. Espectros de reflectância do píxel da imagem no ponto P.3 da figura (B), comparado com espectros da biblioteca espectral do USGS re-amostrados para a resolução espectral do Landsat8. E. Espectros do perfil (B) com remoção do contínuo, mostrando o aumento da profundidade da absorção da banda 5 no ponto P.3.

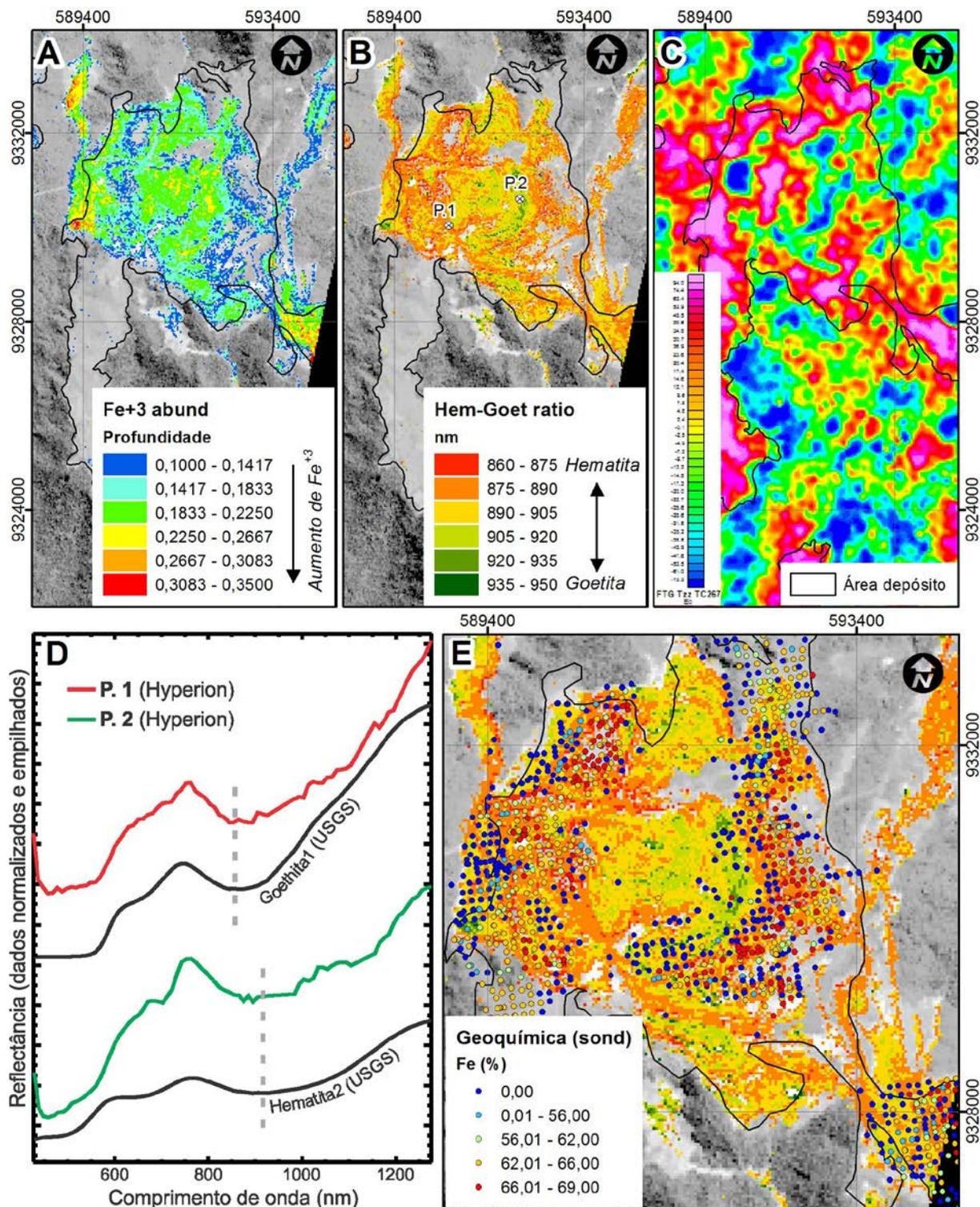


Figura 5. A. Resultado do processamento para a determinação do parâmetro espectral de abundância de Fe⁺³ (Fe⁺³ abund) na imagem Hyperion. B. Resultados do parâmetro de Hem-Goet ratio. C. Componente T_{ZZ} do gradiente gravimétrico, obtido a partir do aerolevantamento 3D-FTG que recobre a área de estudo. D. Espectros de reflectância do pixel P.1 e P.2 da figura (B), comparados com espectros de hematita e goethita da biblioteca espectral do USGS re-amostrada para a resolução espectral do Hyperion. E. Aproximação da figura (B) comparada com a geoquímica de Fe (%) dos primeiros 5 metros de cada sondagem.