

Identificação de minerais de titânio utilizando técnicas de espectroscopia de reflectância.

André Bilibio Westphalen^{1,2}
Dejanira Luderitz Saldanha²
Jean Marcel de Almeida Espinoza¹
Maurício Soares Ortiz¹
Lauro Júlio Calliari³

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS
Rua Alfredo Huch 475, Campus Rio Grande
Rio Grande – RS, CEP 96201-900
andre.westphalen@riogrande.ifrs.edu.br
jean.espinoza@riogrande.ifrs.edu.br
mauricio.ortiz@riogrande.ifrs.edu.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Campus do Vale
CEP: 91501-970 - Porto Alegre, RS
dejanira.saldanha@ufrgs.br

³ Universidade Federal do Rio Grande – FURG
Av. Itália, Km 8 – Campus Carreiros.
CEP: 96201900 – Rio Grande, RS - Brasil
lcalliari@log.furg.br

Abstract: This paper determines the identification of titanium (Ti) found along the coastal region of Rio Grande do Sul through the spectral classification of satellite images of the Hyperion sensor. As a contribution, it demonstrates the possibility of building mineral mapping using satellite data for coastal areas without vegetation cover. The methodology steps were: 1) bibliographic review to determine concentration values typical of the mineral of interest 2) selecting from a spectral library of signatures minerals of interest; 3) determination of the features characteristic for minerals of interest, generating endmember files; 4) obtaining and pre-processing of hyperspectral data from Hyperion to the study area; 5) reducing the dimensionality of the hyperspectral data analyzed in order to avoid redundancy and excess processing; 6) comparing the selected and endmembers this spectral response for each pixel of the image by using the spectral comparison technique known as first-derivative; 7) determination of the presence of minerals of titanium maps for the analyzed area; and 8) comparison between the results and those described in the literature. From this method, they built up thematic images indicating the presumed presence mineral per pixel, represented in scale concentration. The work exposed the use of orbital sensor data as an important mining support tool as well as the mapping of mineral resources over large areas.

Keywords: hyperion, mineral mapping, spectroscopy, titanium.

1. Introdução

As ocorrências e/ ou depósitos de recursos minerais no Brasil, em especial os de minério zircônio, os quais estão associados aos minerais pesados de titânio como a ilmenita (FeTiO_3) e o rutilo (TiO_2), e em termos primários, a depósitos de segregação magmática relacionados a rochas intrusivas alcalinas e a metamorfismo de contato (DNPM, 2014). Em termos secundários, os depósitos de minerais pesados de titânio são do tipo placer e estão associados a cordões litorâneos, depósitos marinhos, depósitos de aluviões e paleoluviões (DNPM, 2014).

Em um cenário regional, nos últimos anos o município de São José do Norte, situado no sul do Rio Grande do Sul (RS), tem se destacado no cenário nacional pelas elevadas concentrações de ilmenita, rutilo e zircão. Segundo Munaro maior presença de minerais pesados encontra-se depositada ao longo do cordão de dunas e na zona praial.

As elevadas concentrações desses minerais tem chamado a atenção de vários investidores os quais, atualmente, tem buscado junto aos órgãos ambientais do estado do RS licença para exploração desses minerais. Algumas iniciativas de atividade de mineração foram iniciadas ao longo das décadas de 1980 e 1990. Contudo não se obteve sucesso, pois durante o processo de licenciamento ambiental foi observado que as zonas destinadas a mineração estavam inseridas em áreas de preservação permanente (APPs).

A análise química de minerais é um passo fundamental para um entendimento geológico e para mensuração de jazidas. Dentre a variedade de métodos que podem ser utilizados para extrair as informações minerais dos espectros de reflectância são utilizados: razões de bandas (Crowley et al.,1989); ajustes polinomiais (Cudahy et al., 2008); gaussianos (Mustard et al., 2007); e métodos estatísticos supervisionados como análise de variáveis canônicas, mínimos quadrados (Clark et al.,1990),e mínimos quadrados parciais (Haaland & Thomas, 1988). Todos estes métodos citados não se baseiam em obter o coeficiente de absorção em um determinado comprimento de onda, mas em extrair Informações a respeito de minerais específicos por meio da correlação dos dados espectrais com bibliotecas espectrais ou com dados independentes, como análises químicas.

Outra forma de obtenção da presença mineral e química através de assinaturas espectrais é por emprego de técnicas de espectroscopia de reflectância. Essa técnica, além de ser de baixo custo, é muito utilizada para a Identificação da mineralogia de depósitos minerais nas diferentes etapas da exploração mineral (Herrmann et al., 2001; Ducart et al.,2006; Harraden et al., 2013). A análise espectral destes depósitos permite o melhor entendimento das zonas mineralizadas, auxiliando tanto no entendimento da distribuição espacial do minério, como dos contaminantes (Ducart et al., 2006). A quantificação pode ser feita por meio da correlação dos dados espectrais com bibliotecas espectrais, que apresentam espectros de amostras com composição mineralógica conhecida, ou por meio da correlação dos dados espectrais com dados multi-fonte, como dados geoquímicos e propriedades físicas da amostra da rocha (Cudahy et al., 2008).

O processo de aquisição de imagens em centenas de bandas espectrais, de forma a possibilitar que de cada um dos pixels das mesmas seja possível derivar uma curva de reflectância espectral detalhada, recebe o nome de sensoriamento remoto hiperespectral

(*hyperspectral remote sensing*) (Jensen, 2009). Estes espectros extraídos podem ser comparados diretamente com espectros medidos no campo ou em laboratório através de técnicas de comparação estatística multidimensional. Como técnicas mais consolidadas para a interpretação e classificação de dados hiperespectrais podemos citar a análise por componentes principais (PCA), a classificação por angulação entre espectros, SAM – *Spectral Angle Mapper* (Espinoza, 2009; Curran, 1994) e a técnica de comparação por derivadas de espectros (Espinoza, 2009; Curran, 1994). Aspectos de terreno como cobertura vegetal e umidade podem alterar drasticamente o desempenho destes métodos, o que leva a uma melhor aplicação em áreas descobertas como desertos e zonas praias.

Este trabalho objetiva empregar a técnica de classificação hiperespectral de comparação de espectros através da derivada primeira (Espinoza, 2009; Curran, 1994) em uma imagem multiespectral do sensor Hyperion para o mapeamento da presença de minerais pesados ligados ao titânio ao longo da faixa litorânea gaúcha. Dessa forma, foi construído um mapa temático da presença de minerais característico do titânio, indicando os passos metodológicos para o uso de dados hiperespectrais no mapeamento destes minerais.

A área de estudo demonstrada na Figura 1 está situada na localidade do Retiro (31°38'47"S e 52°2'16" O), sul do município de São José do Norte - RS, litoral médio gaúcho, compreendido entre o Oceano Atlântico e a Lagoa do Patos.

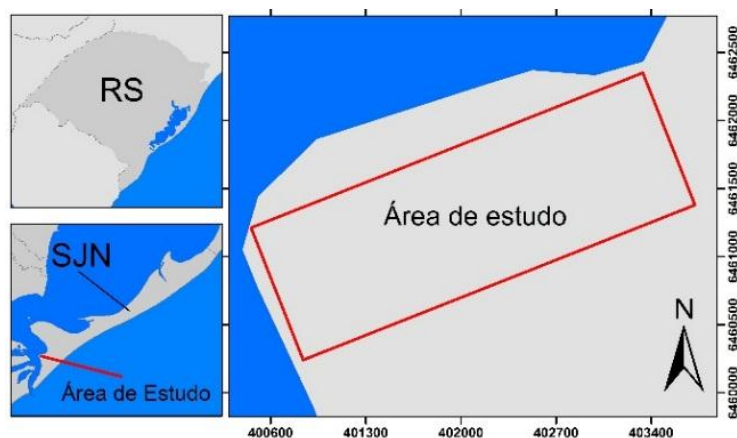


Fig. 1 – Localização da área de estudo.

Nesta região, a planície costeira varia entre 20 e 80 km extensão, responsável por depositar grandes cargas minerais junto as areias praias ao longo do tempo (Munaro, 1994). O clima local possui como temperaturas médias 26°C no verão e 12°C no inverno, com precipitações oscilando entre 1000 e 1500 mm anuais, sendo uniformemente distribuídas por todo o ano (Munaro, op cit).

2. Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho teve início através da revisão bibliográfica para identificação das características minerais da área de estudo, onde através dos trabalhos de Tomazelli (1978), Munaro (1994), Corrêa et al. (2001), Dillenburg et al.(2004) e Corrêa et. al. (2006) foram obtidos os valores típicos de concentração do mineral de interesse. A partir da identificação da área de estudo e da seleção dos minerais de titânio como foco de pesquisa, estabeleceram-se os passos metodológicos desta pesquisa, descritos pela figura 2.

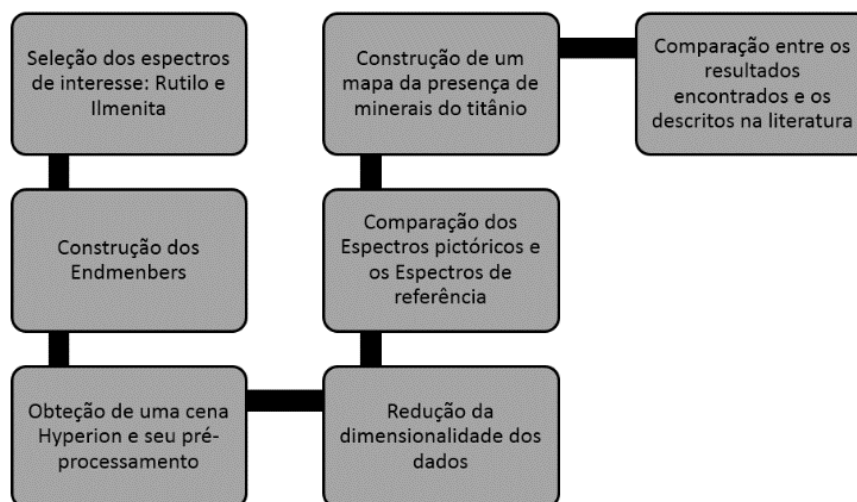


Fig. 2 - Passos metodológicos adotados na execução desse trabalho.

Sequencialmente foram selecionados as assinaturas de interesse a partir de uma biblioteca espectral de minerais (i.e., biblioteca espectral de minerais do serviço geológico americano-USGS), formando um conjunto de espectros de interesse. Com os espectros selecionados, foi executada a determinação das feições características, gerando arquivos de *endmember*.

Paralelamente, foi realizada a obtenção e o pré-processamento de uma imagem hiperespectral do sensor *HYPERION*, do dia 03/03/2015 para área de estudo. As características desta cena estão presentes no quadro 1.

Quadro 1 - Informações sobre o sensor Hyperion. Fonte: adaptado de USGS(2016)

órbita	Intervalo Espectral	Resolução Espectral
705km/heliossincrona	400-2500 nm	10 nm
Tamanho da cena	Resolução Espacial	Quantização
aproximadamente 28x95 km	pixel=30x30m	12 bit

Como sequência metodológica, seguiu-se a redução da dimensionalidade da cena analisada a fim de evitar redundância e excesso de processamento. Com isso, a comparação entre os dados de referencia e aqueles presentes em cada pixel da cena foi facilitada, evitando o retrabalho estatístico e inferências espúrias.

Com os *endmembers* selecionados e a resposta espectral presente em cada pixel da imagem, executou-se um conjunto de técnicas conhecidas como análise de espectros através da Decomposição de Curvas por meio da Derivada Primera (DCDP). De forma geral, esta técnica de classificação hiperespectral se baseia na análise da similaridade entre os espectros de um conjunto de materiais de referência, ou *endmembers*, e as curvas espectrais correspondentes a cada pixel da imagem. A metodologia do processamento hiperespectral utilizada foi proposta por Curran (1994) e implementada em trabalhos por Espinoza (2006), Boardman et al. (1995) e Kruse et al. (1996), aqui aplicada através do software Matlab ®:

- a) correção atmosférica e transformação para reflectância dos dados *Hyperion* através do Aplicativo FLAASH do *software* ENVI;
- b) Redução da dimensionalidade dos dados *Hyperion* por meio da técnica de componentes principais (*PCA*);
- c) seleção e caracterização espectral dos minerais de interesse com o objetivo de criar uma biblioteca espectral de referência e dados de campo obtidos na literatura descrevendo a concentração mineral de interesse (concentração de titânio);
- d) mapeamento espacial pela técnica DCDP e estimativa da presença para os minerais de interesse, representada em escala de concentração.

Os dados *Hyperion* foram obtidos a partir do repositório público de dados do serviço geológico americano (USGS), conhecido como *EarthExplorer*. Os dados são obtidos em contadores digitais, contendo um conjunto de informações auxiliares presentes em um arquivo de metadados que permite a transformação dos dados para radiância (calibração dos dados).

A coluna atmosférica que separa o sensor do alvo provoca uma série de processos de interação com o fluxo radiante (i.e., absorção e espalhamento da radiação), ocasionando distorção nos dados coletados pelo sensor orbital. (JENSEN, 2009). Para a correção atmosférica dos dados do sensor *Hyperion* foi utilizado o aplicativo FLAASH presente junto ao *software* ENVI. Este aplicativo oferece uma série de estratégias para a correção atmosférica de imagens orbitais, considerando as condições atmosféricas locais através de dados auxiliares obtidos pelo sensor orbital MODIS. Após a correção atmosférica, tem-se os dados representados em reflectância, necessário para comparação entre as imagens e os espectros de referência.

A técnica de Decomposição de Curvas por meio da Derivada Primera (DCDP) seguiu os passos sequenciais descritos no fluxograma da Figura 3.

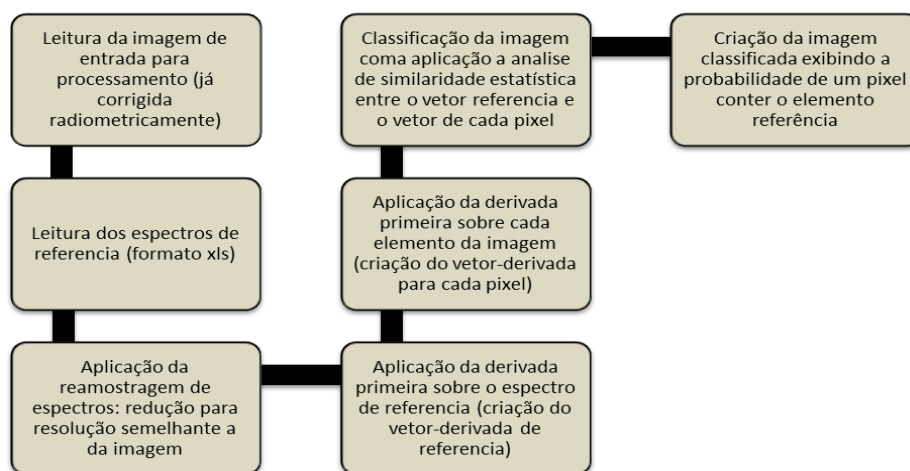


Fig. 3 – Fluxograma da sequência de processos para a aplicação do DCDP.

A imagem processada constituiu de uma cena, compreendendo a região do Retiro na cidade de São José do Norte-RS e suas adjacências, perfazendo as áreas constituintes da descrição trazida por Correa et al. (2006) e Dillenburg et al. (2004) como áreas com presença de minerais pesados com predominância de titânio em sua camada superficial.

As técnicas empregadas trazem como vantagens o fato de evitar erros de escala entre os espectros comparados por conta de distintas iluminações. Isto ocorre porque ao efetuar o cálculo das derivadas, a técnica compara os espectros através dos sinais das derivadas e não através de seus valores, o que significa comparar a forma dos espectros ao invés de comparar seus valores,

o que elimina erros devido as diferenças de iluminação e cobertura atmosférica entre os espectros de referência e a imagem.

Um conjunto de aproximadamente 50 pontos de referência, adquiridos a partir de áreas descritas ao longo da área de estudo por Corrêa et al. (2006) e Dillenburg et al. (2004), permitiu uma espacialização da variabilidade natural da distribuição mineral local, servindo de referência para a validação da técnica de mapeamento mineral via dados orbitais aqui proposta.

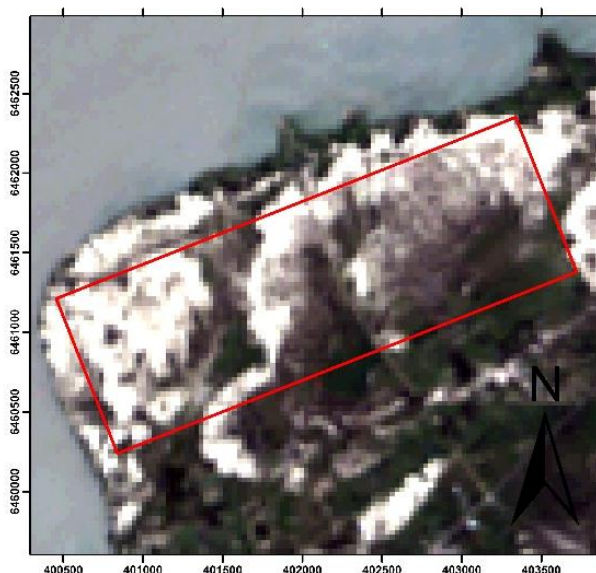
3. Resultados e discussões

Os resultados obtidos da análise espectral permitiram a identificação da presença de minerais de titânio ao longo da área de estudo a partir de técnicas de comparação de espectros.

Uma análise comparativa entre os espectros reamostrados para a resolução espectral do *Hyperion* após a seleção de bandas por análise por componentes principais (PCA) mostra que a coincidência entre os espectros associados a cada pixel das imagens e os espectros de laboratório possui alta correlação para áreas descritas como áreas de alta densidade de titânio ($R^2 = 91,36\%$). Estes dados de espectroscopia de reflectância em conjunto com a espacialização das concentrações minerais propostas por Corrêa et al. (2006) constituíram arquivos de verdade de campo utilizados posteriormente para validar os resultados obtidos com a classificação espectral.

A comparação entre o mapeamento de titânio (Fig. 4) obtido pela técnica DCDP e a descrição da presença e concentração mineral para o titânio descritas por Corrêa et al. (2006) e Dillenburg et al. (2004), exibiu forte correlação, com um índice de acurácia kappa (k) de 96% e um coeficiente de determinação estatística R^2 da ordem de 94%. O mapeamento mineral de minerais pesados, em especial do titânio com dados Hyperion foi satisfatório com relação à identificação geral das concentrações observadas em campo, ficando exposta a limitação da prospecção em áreas vegetadas e/ou cobertas por água (áreas não classificadas).

A)



Legenda

Área piloto para estudo de campo

Cena Hyperion (03/03/2015)

RGB

Red: Band_32

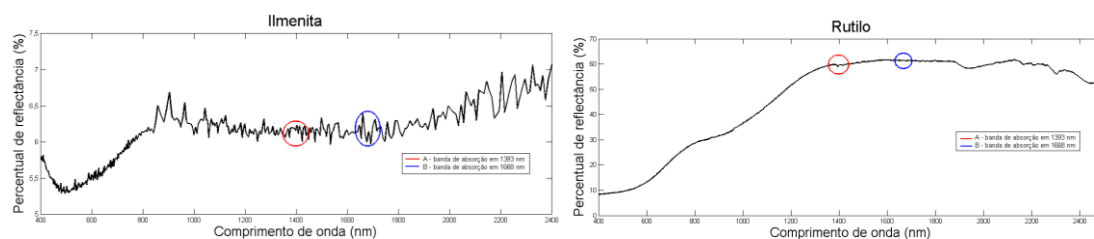
Green: Band_22

Blue: Band_12

Informações sobre o mapa:

Sistema de coordenadas com projeção UTM, datum de referência WGS 84. Imagem elaborada a partir da classificação espectral de um recorte de uma cena HYPERION.

B)



C)

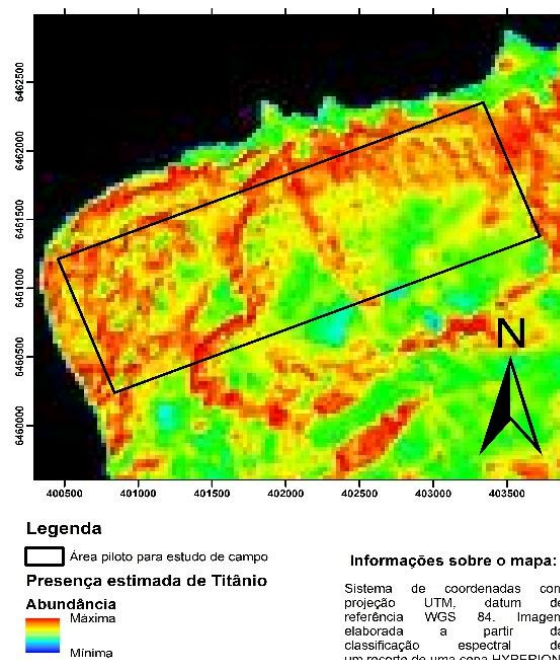


Fig.4 – A) Imagem HYPERION com composição colorida (cor verdadeira) – RGB/31,21,11. B) Espectros dos minerais de titânio (biblioteca espectral). C) Imagem classificada do mapeamento de titânio – apenas com as áreas de titânio acima do background.

As zonas de maior coincidência entre o vetor referência e o vetor de cada pixel representam-se como áreas de maior coincidência estatística, exibindo maior valores para o índice R^2 . A exemplo, zonas com coincidência entre as inflexões das derivadas do vetor de referência e o vetor de um pixels acima de 90% determina este pixel como um elemento com 90% ou mais de probabilidade de pertencer a classe correspondente a o vetor de referência.

A Ilmenita é mineral tipicamente opaco, praticamente sem eventos ou feições espectrais no visível, no infravermelho próximo e no infravermelho médio, causados por bandas de condução dos óxidos de ferro e de titânio que se estendem através do espectro. A opacidade deste mineral é atribuída por Strens & Wood (1979) pelas transferências de carga entre íons (Fe^{2+} , Fe^{3+} , O^{2-} e Ti^{4+}).

Agente provocador das absorções em **1393 e 1668 nm**: transferência de cargas $Fe^{2+} \Rightarrow O$; $Ti^{4+} \Rightarrow O$ e $Fe^{2+} \Rightarrow Ti^{4+}$ e às transições intra-iônicas Fe^{2+} . Por conta dessa característica, as feições espectrais desses minerais foram evidenciadas pelas bandas espectrais do sensor hyperion nº 125 e compreendidas entre o nº 151 e 153, o que tornou possível diferenciar a presença desses minerais entre a cobertura analisada.

4. Conclusões

O uso concomitante de imagens *Hyperion* e da técnica empregada neste trabalho resultou em uma ferramenta confiável de mapeamento mineral em áreas com cobertura exposta, livre de vegetação, apresentando valores expressivos com acertos acima de 90% para área analisada. Considerando as características do titânio, fica evidente a possibilidade da caracterização espectral do mesmo e o posterior emprego dessa caracterização para classificação de imagens orbitais como forma de apoio ao trabalho geológico de campo. Resultados diferenciados devem ser esperados quando consideramos a dinâmica da refletância de áreas com cobertura vegetal pronunciada, devido a influência da vegetação e problemas como o sombreamento diferenciado em função da variação do ângulo de incidência solar.

Referências Bibliográficas

- Corrêa, I.C.S.; Zouain, R.N.A.; Weschenfelder, J.; Tomazelli, L.J.. Heavy minerals from south Brazilian continental shelf to North Argentina: distribution and provenance. In: **Congreso Latinoamericano de Sedimentología**. San Carlos de Bariloche, Rio Negro-Argentina. *Resúmenes...*, 2006. p.79.
- Curran, P.J. **Imaging spectrometry - its present and future role in ENVI@ronmentalresarch**. In: HILL, J.; MEGIER, J.(ed.) *Imaging spectrometry - a tool for ENVI@ronmental observations*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. *Remote Sensing of Environment*, v.39, 1994. p. 153-166.
- Dillenburg, S.R.; Tomazelli, L.J.; Barboza, E.G.. Barrier evolution and placer formation at Bujuru southern Brazil. *Mar. Geol.*, v.203, 2004. p.43-56.
- Espinoza, J.M.A. **Caracterização espectral das rochas constituintes dos rejeitos de garimpo de pedra ametista - região de Ametista do Sul, Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado no programa de Pós-Graduação em sensoriamento remoto, UFRGS, Porto Alegre. 2006.126 f.
- Klein, A.H.F.; Griep, G.H.; Calliari, L.J.; Villwock, J.A.. **Ocorrências de Concreções Fosfáticas no Terraço do Rio Grande**. In: Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, SC. v.37., 1992. p. 202-203.
- Munaro, P.. **Geologia e mineralogia dos depósitos de minerais pesados de Bojurú**. Dissertação de Mestrado da Pós-Graduação em Geociências, UFRGS, Porto Alegre.1994. 90f.
- Strens, R.G.J.; Wood, B.J.. Diffuse Reflectance spectra and optical properties of some iron and titanium oxides and oxyhydroxides. *Min. Mag.*, v. 43, 1979. p. 347-354.
- Tomazelli, L. J. Minerais pesados da plataforma continental do Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia-UNISINOS*, São Leopoldo-RS, Brasil, v. 2, 1978. p.103-159.
- DNPM. Titânio - Sumário Mineral. **Departamento Nacional de Produção Mineral**. v. 34, 2014., 116 p.
- 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: Publicly Available Report P2007/364, CSIRO Exploration and Mining, 2008.152 p.
- Ducart, D. F. **Alteração hidrotermal do prospecto aurífero Cerro La Mina, Los Menucos, Patagônia, Argentina: geologia, sensoriamento remoto e isótopos estáveis**. Tese de doutorado do programa de pós-graduação em Geociências. Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2006.173 f.
- Hermann, W.; Blake, M.; Doyle, M.; Huston, D.; Kamprad, J.; Merry, N.; Pontual, S.. Short wavelength infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery And Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. **Economic Geology and The Bulletin of the Society of Economic Geologists**, v. 96, 2001, p.939-955.