

Espectroscopia de reflectância de rochas da Suíte Alcalina Juquiá, sudeste do Estado de São Paulo

Deborah Mendes ¹
Monica Mazzini Perrotta ¹
Manoel Augusto Corrêa da Costa¹
Mariane Brumatti ¹
Vidyã Vieira de Almeida ¹

¹ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM
Rua Costa, 55 – 01304-010 – São Paulo - SP, Brasil
{deborah.mendes, monica.perrotta, manoel.costa, mariane.brumatti,
vidya.almeida}@cprm.gov.br

Palavras-chave: espectroscopia de reflectância, Suíte Alcalina de Juquiá, exploração de fosfato.

Abstract. The Juquiá Alkaline Suite occurs in the southern portion of the Ribeira Belt. It constitutes a circular zoned intrusion, with actually exposed area about 14 km², seated in partially fenitized gneisses. In this region occur olivine-pyroxenites and pyroxenites, followed by nefeline-syenites, ijolites, melteijites and urtites, besides central carbonatite occupying around 2.5 km², forming subanelar concentric pattern. Carbonatite Alkaline intrusions located in the Vale do Ribeira (SP-PR) have great significance on the national scene and have been exploited for phosphate for over 50 years. Reflectance spectroscopy data of rock and soil samples of carbonatite, mainly weathered, and barite from veins were acquired in laboratory by the ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution spectrometer. The reflectance spectroscopy has proved to be a relevant tool to the investigation of the Juquiá Alkaline Suite, including the carbonatite rocks and the products of weathering. It was possible to obtain through the technique, the qualitative composition of the main carbonate phase (Fe-dolomite), the identification of neoformed minerals, such as hydroxyapatite in isalterite. The technique has also proved to be a fast and low cost alternative to the identification of rare earth elements. The new data can help the discovery and delimitation of new carbonatite occurrences through multispectral optical remote sensing.

Keywords: reflectance spectroscopy, Juquiá Alkaline Suite, phosphatic exploration.

1. Introdução

As intrusões alcalino-carbonatíticas localizadas no Vale do Ribeira (SP-PR) têm grande importância no cenário nacional e vêm sendo exploradas para fosfato há mais de 50 anos. As rochas alcalinas são reconhecidas por conterem minerais e substâncias de elevado interesse econômico, tais como: fósforo, flúor, nióbio, urânio, tório, tântalo e elementos terras-raras (ETR).

A Suíte Alcalina Juquiá está localizada ao sul da Zona de cisalhamento Lancinha e ao norte do Lineamento Guapiara, na folha Registro (SG.23-V-A-I) (Figura 1). Possui área aflorante de cerca de 14 km² e formato circular. Originalmente descrita por Born (1971) e, posteriormente, por Macciotta *et al.* (1988), Beccaluva *et al.* (1992) e Azzone *et al.* (2013), é intrusiva na Unidade de gnaisse bandado do Complexo Atuba, de idade paleoproterozoica. É composta por olivina-piroxenito, piroxenito, nefelina sienito, ijolito, melteigito, urtito e carbonatito (beforsito), além de diques alcalinos.

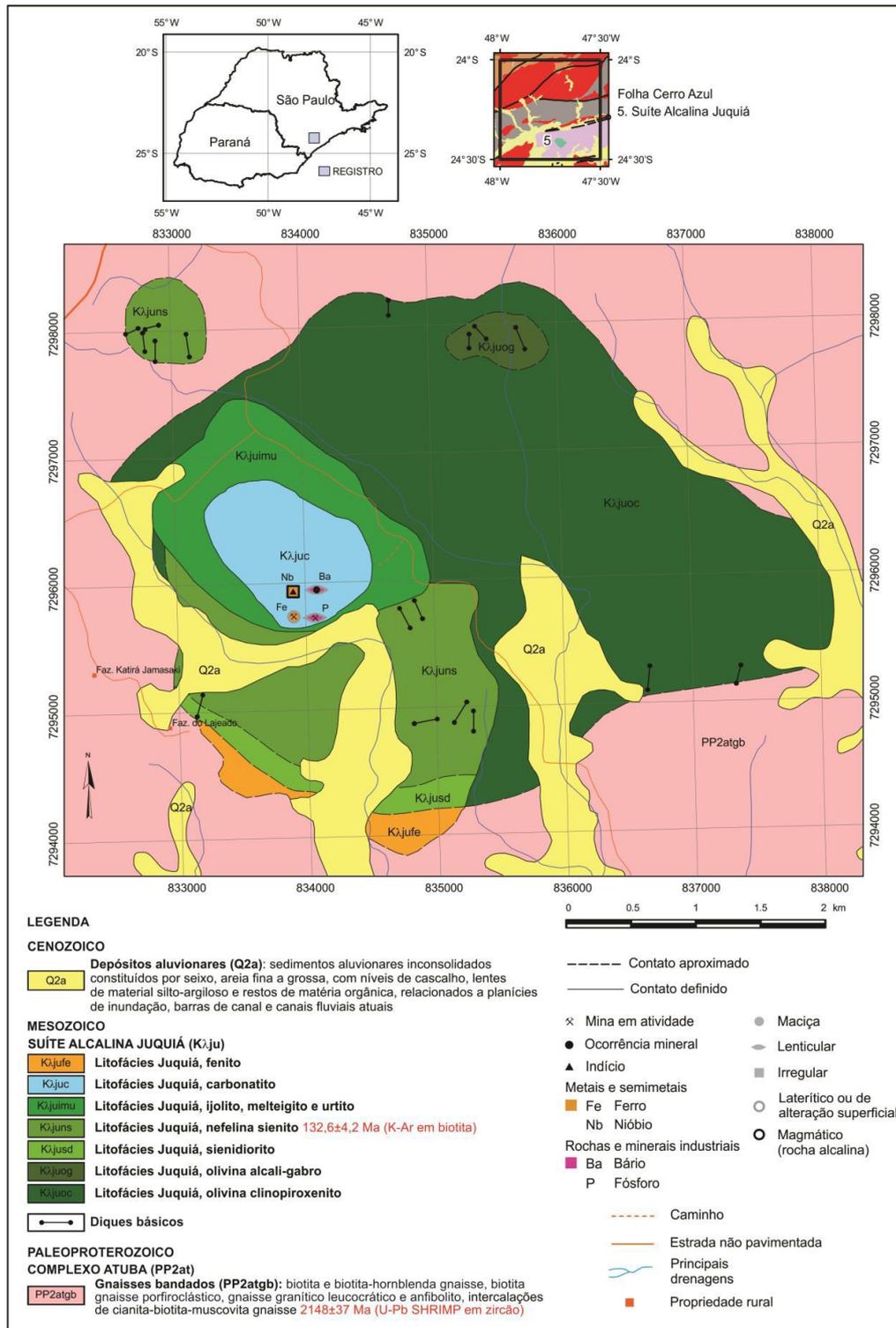


Figura 1. Mapa geológico da Suíte Alcalina Juquiá, modificado Beccaluva *et al.* (1992).

As rochas desta suíte se apresentam intensamente alteradas, sendo que o manto de intemperismo sobre o Morro do Serrote, principal local de coleta das amostras e onde se localiza a mina de fosfato carbonatítico Socal S/A Mineração e Intercâmbio Comercial e Indústria, possui cerca de 50 metros de espessura. A análise por espectroscopia de reflectância foi realizada em rochas carbonatíticas da Suíte Alcalina Juquiá, rochas encaixantes e amostras de solo que recobrem os carbonatitos.

2. Metodologia de Trabalho

Análises espectrorradiométricas foram realizadas no Laboratório de Sensoriamento Remoto Geológico e Espectroscopia Mineral, da Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica (DISEGE-SUREG/SP), por meio do espectrorradiômetro ASD-FieldSpec-3 Hi-Resolution, cujo alcance espectral vai do visível ao infravermelho de ondas curtas, no intervalo de 350 a 2.500 nm, e resolução espectral de 3 nm (em 700 nm), 8,5 nm (em 1.400 nm) e 6,5 nm (em 2.500 nm), num total de 2.151 bandas. As medidas são registradas em valores de reflectância proporcional, relativa a uma referência padrão branca de máxima reflectância difusa (do tipo Spectralon).

As análises tiveram como objetivo a obtenção de informações mineralógicas qualitativas adicionais, principalmente no que diz respeito ao conteúdo mineral dos litotipos associados ao minério de fosfato e suas encaixantes, bem como das associações minerais desenvolvidas como resposta aos processos de alteração supérgena, que são essenciais para a concentração do minério.

O conjunto de amostras contém exemplares de carbonatito em diferentes estágios de alteração, formando isalteritas e aloteritas, veios de barita, rochas encaixantes e alíquotas de solo. Procura-se medir uma assinatura espectral para cada diferente categoria de face conforme a variação do tipo (exposta, quebra natural ou serrada), grau de intemperismo, cor e relação angular com a foliação ou bandamento principal. As medidas são tomadas em número suficiente para contemplar toda a variação, utilizando-se como instrumento uma sonda de contato com luz artificial própria acoplada a uma fibra óptica. Para análise das amostras de solo, estas são dispostas em placa de Petri e a fibra óptica é conectada a uma plataforma giratória com luz artificial.

Os espectros obtidos em laboratório foram analisados em função dos litotipos identificados em campo. A classificação mineralógica foi feita nos softwares ENVI[®] 5.2 e *The Spectral Geologist* (TSG). Utilizou-se tanto os espectros de reflectância como os espectros com o contínuo removido, que é calculado a partir do quociente entre o valor de reflectância medido em cada ponto do espectro pelo valor correspondente em uma linha envoltória que tangencia os máximos de reflectância da curva espectral. A remoção do contínuo permite realçar as feições de absorção (Meer, 2000). As bibliotecas espectrais de referência utilizadas na identificação mineral foram as do *United States Geological Survey* (USGS) (Clark *et al.*, 1993), do *GMEX Spectral Library Handbook* (Pontual *et al.*, 2008) e do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL).

3. Resultados e Discussão

Nas amostras de carbonatito analisadas (Figura 2), carbonatos foram observados nas faces onde a mineralogia original está mais bem preservada. Estes, com a evolução da alteração supérgena, são substituídos progressivamente por apatita. Na figura 3 os espectros medidos nas amostras foram organizados conforme a intensificação da alteração de forma que Fe-carbonato é identificado pelas feições de absorção em aproximadamente 2,319 μm e 1,99 μm , típicas das moléculas de CO_3 e em aproximadamente 1,06 μm e 1,27 μm , características do Fe ferroso. A posição e forma da feição em 2,319 μm e a presença das feições secundárias em 1,865 μm e 2,141 μm , e do par de feições em 1,938 μm e 1,990 μm indicam composição dolomítica do carbonato. Estas feições suavizam-se com a intensificação da alteração das mesmas amostras (figuras 2A e B), dando lugar, nos espectros das faces mais alteradas e em amostras alteradas e de solo (figuras 2C e D), a uma feição assimétrica em 1,925 μm que indica a presença de apatitas secundárias de assinatura espectral semelhante à hidroxiapatita (Figura 3). Note-se na figura 3 o espectro JUQ.039, medido na amostra VV-R-0081-II, misto de Fe-carbonato e hidroxiapatita.



Figura 2. Amostras de carbonatitos e isalteritas. A) Amostra de isalterita muito intemperizada, onde é possível ver as cavidades deixadas pelos minerais lixiviados. B) Isalterita em estágio evoluído de alteração. C) solo de carbonatito. D e E) Amostras de carbonatito semi-alteradas com faces mais e menos preservadas da alteração supérgena. F) amostra de carbonatito em estágio avançado de alteração.

Os veios de barita mostram diferentes estágios de alteração sendo que nas porções mais sãs os cristais são vítreos e incolores (Alcover Neto e Toledo, 1993). A alteração promove dissolução interna e externa nos planos de clivagem e na superfície dos cristais que podem adquirir tonalidades de verde com eventual ferruginização. Com a evolução da alteração os minerais são totalmente dissolvidos e podem ocorrer pseudomorfoses pela formação de apatita supérgena. A figura 4 mostra fotografias das amostras de barita analisadas, extraídas de veios. A cor do mineral é incolor ou branca (Figura 4A) levemente esverdeada com feições de dissolução (Figura 4B) ou verde (Figura 4C). Na figura 5 encontram-se assinaturas espectrais medidas, que, apesar de não muito ricas em feições diagnósticas, guardam semelhança com os espectros de referência do mineral nas bibliotecas do JPL e do USGS. Em todos os espectros observa-se feição de absorção em $1,93 \mu\text{m}$ e em alguns, inclusive no do JPL, uma feição tênue em $1,443 \mu\text{m}$, provavelmente associada à presença de água em possíveis inclusões fluidas. Na barita de cor verde clara (amostra VV-R-0084-II, Figura 4C) as curvas espectrais (JUQ.058, JUQ.059 e JUQ.062) mostram picos de reflectância entre $0,543 \mu\text{m}$ e $0,563 \mu\text{m}$, região do espectro eletromagnético que reflete a cor verde. Adicionalmente, observa-se o desenvolvimento de uma feição de absorção em aproximadamente $2,244 \mu\text{m}$, associada à ligação Fe-OH. Em alguns espectros, tomados nas faces mais alteradas das amostras, pode ser notada uma feição de absorção em $2,209 \mu\text{m}$, evidenciando a presença de argilominerais.

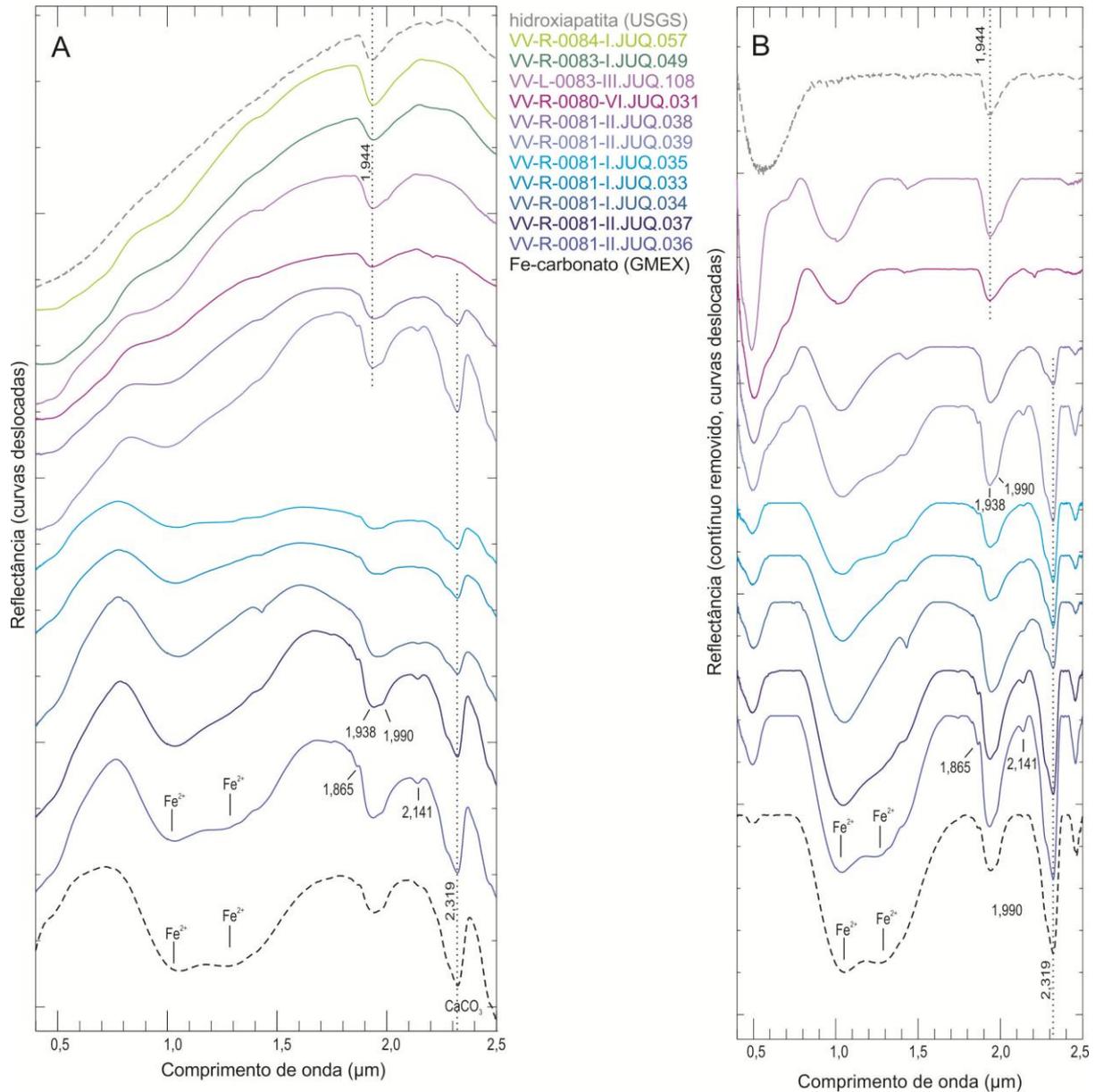


Figura 3. Assinaturas espectrais de amostras de carbonatitos. A) Espectros de reflectância. B) Espectros com contínuo removido. Em tonalidades de azul, espectros tomados nas faces mais preservadas das amostras VV-R-0081-I (Figura 2A) e VV-R-0081-II (Figura 2B), com feições de absorção típicas de Fe-carbonato, suavizadas nos espectros de cor azul clara. Em tonalidades de roxo, espectros medidos nas faces mais alteradas da amostra VV-R-0081-II, e rosa espectros das amostras VV-R-0080-VI (Figura 2C) e VV-L-0083-III (Figura 2D) onde se identifica feição de hidroxiapatita. Curvas descontínuas em cor preta e cinza representam espectros extraídos das bibliotecas de referência do GMEX (Fe-carbonato) e USGS (hidroxiapatita) respectivamente.



Figura 4. Amostras dos veios de barita analisadas. A) Barita fresca, de coloração branca a transparente. B) Barita apresenta leve tom de verde, com óxidos de ferro preenchendo cavidades. C) Barita verde clara.

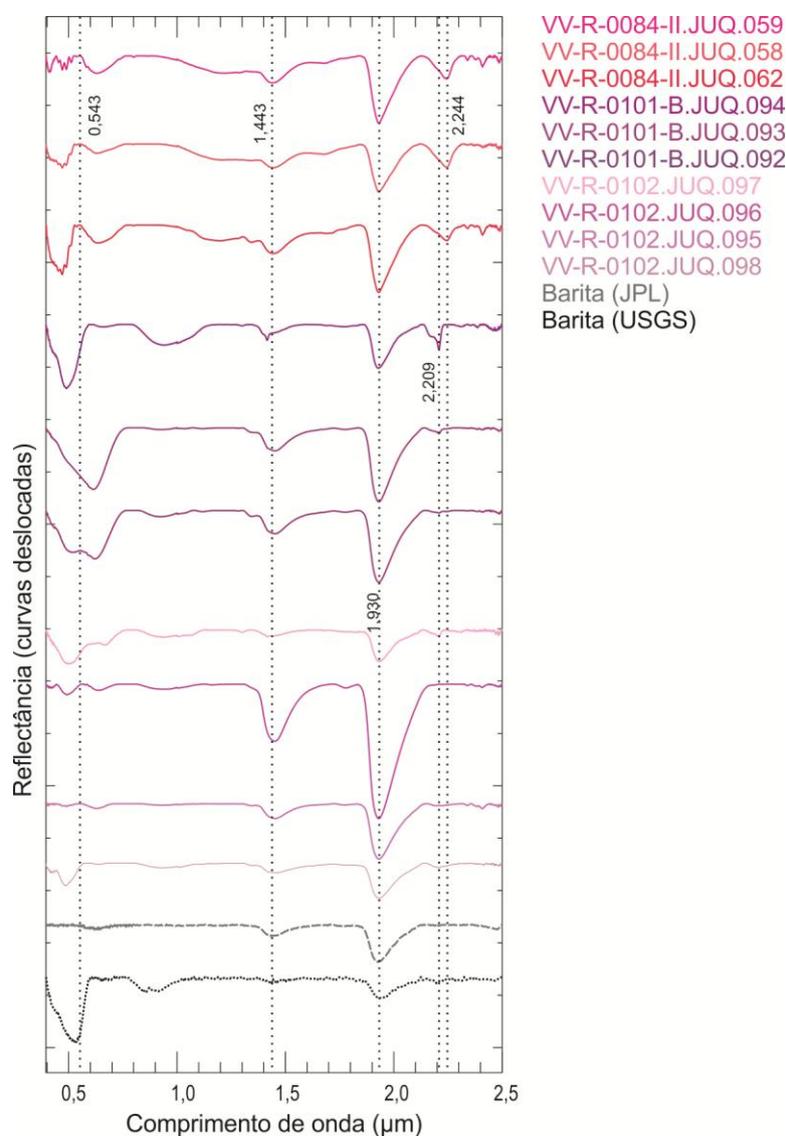


Figura 5. Assinaturas espectrais de amostras coletadas nos veios de barita (espectros com contínuo removido). Curvas descontínuas em cor preta e cinza representam espectros de barita extraídos das bibliotecas de referência do USGS e JPL respectivamente.

Feições diagnósticas de ETR foram detectadas em amostras de carbonatitos (VV-R-0081-I e VV-R-0081-II, Figuras 2A e B); barita (VV-R-0084-II, Figura 4C); isalterita (VV-R-0083-I, VV-R-0083-II e VV-R-0084-I; Figuras 6A, B e C); e em uma amostra classificada em campo como de rocha encaixante alterada de provável composição sienítica (VV-R-0089-A). Curvas espectrais destas amostras no intervalo de comprimentos de onda entre 0,550 μm e 0,900 μm podem ser observadas na figura 7, com destaque para as feições de absorção em 0,579 μm , 0,587 μm , 0,737 μm , 0,748 μm , 0,802 μm e 0,873 μm , atribuídas na literatura ao Nd^{3+} .

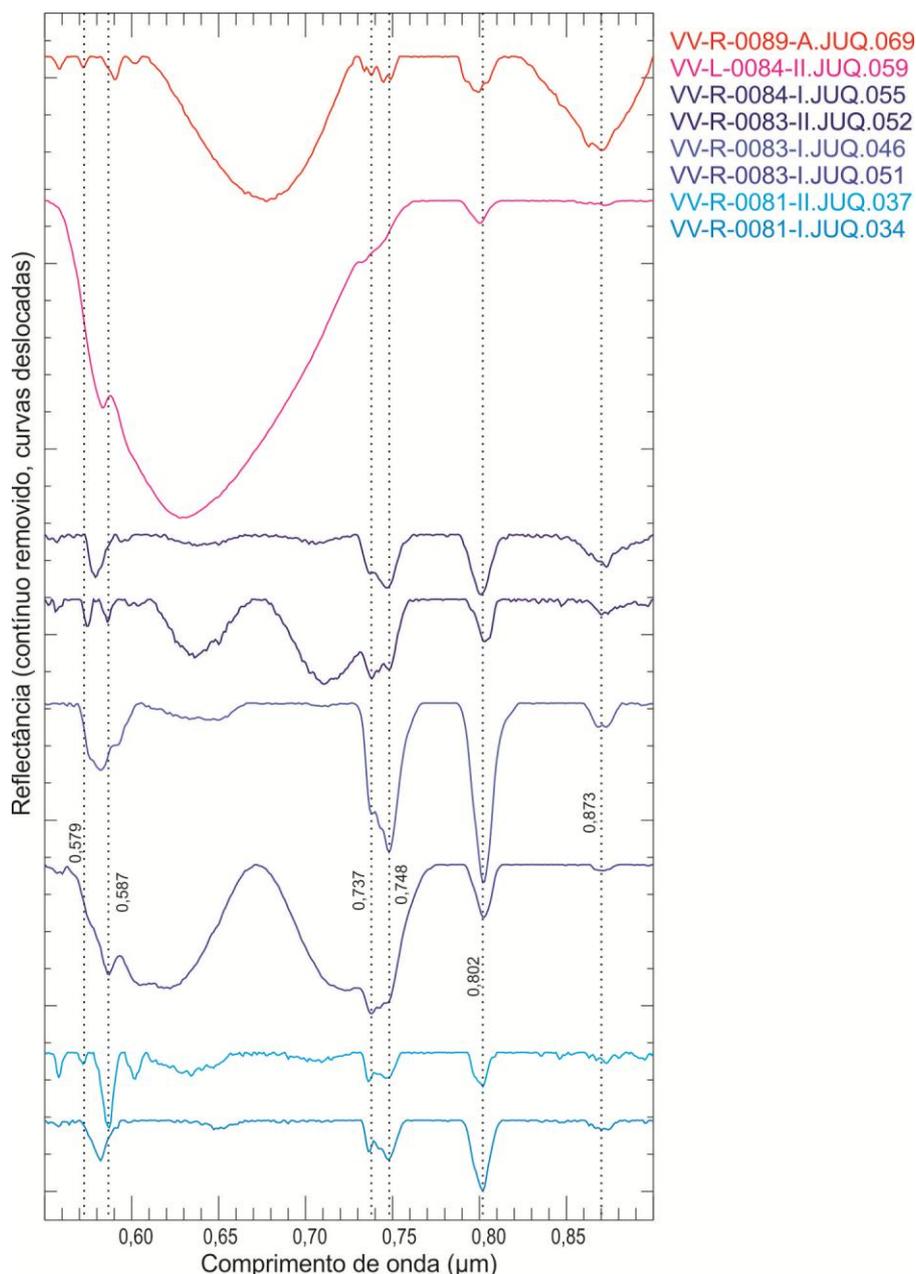


Figura 6. Assinaturas espectrais de amostras com feições diagnósticas de ETR. Espectros com contínuo removido. Curvas em tons de azul claro representam amostras de carbonatito, em tonalidades de azul escuro amostras de isalterita, em rosa de amostra de barita, e em laranja de amostra de rocha encaixante alterada.

4. Conclusões

As curvas espectrais obtidas nas amostras de carbonatito evidenciaram a Fe-dolomita como principal mineral de carbonato presente, que, com a evolução da alteração é parcialmente substituído por hidroxiapatita secundária, gerando espectros mistos que indicam também a oxidação do ferro ferroso. As amostras de isalterita apresentam espectros cujas feições de absorção mais importantes têm relação com a presença de moléculas de hidroxila e de água. Ocorrem ainda feições associadas ao ferro férrico, mas, a ausência total de feições diagnósticas do carbonato evidencia que neste material de alteração a Fe-dolomita já foi totalmente lixiviada.

As análises de amostras de barita mostraram que a coloração verde, descrita na literatura como evidência de alteração deste mineral, está associada à presença da ligação Fe-OH na sua estrutura, ausente nos exemplares brancos ou incolores.

Feições diagnósticas de elementos terras raras foram detectadas em assinaturas espectrais de amostras de carbonatito, isalterita, barita e de rocha encaixante alterada de provável composição sienítica. As assinaturas espectrais identificadas no intervalo de comprimentos de onda entre 0,550 μm e 0,900 μm são atribuídas na literatura ao íon Nd^{+3} .

Referências Bibliográficas

- Alcover Neto, A.; Toledo, M. C. M. de. Evolução supérgena do carbonatito de Juquiá (SP). **Revista do Instituto Geológico**, v.14, n.1, p. 31-43, jun. 1993.
- Azzone R.G.; Enrich, G.E.R.; Gomes, C.B.; Ruberti, E. Trace element composition of parental magmas from mafic-ultramafic cumulates determined by in situ mineral analyses: The Juquiá mafic-ultramafic alkaline-carbonatite massif, SE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v.41, p. 5-21, jan. 2013.
- Beccaluva, L.; Barbieri, M.; Born, H.; Brotzu, R.; Coltorti, M.; Conte, A.; Garbarino, C.; Gomes, C.B.; Macciotta, G.; Morbidelli, L.; Ruberti, E.; Siena, F.; Traversa, G. Fractional Crystallization and Liquid Immiscibility Processes in the Alkaline Carbonatite Complex of Juquiá (São Paulo, Brazil). **Journal of Petrology**, v.33, n.6, p. 1371-1404, dez. 1992.
- Born, H. **O complexo alcalino de Juquiá**. 1971. vi, 176p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Astronomia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1971.
- Clark, R. N.; Swayze, G. A.; Gallagher, A.; King, T. V. V.; Calvin, W. M. **The U. S. Geological Survey Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 mm**. [EUA]: USGS, 1993. 1326 p. (Open File Report, 592).
- Macciotta, G.; Barbieri, M.; Beccaluva, L.; Born, H.; Brotzu, P.; Conte, A.; Garbarino, C.; Gomes, C.B.; Morbidelli, L.; Ruberti, E.; Sciena, F. & Traversa, G. Petrological and geochemical studies of alkaline rocks from continental Brazil. The Juquiá intrusive alkaline-carbonatite complex, state of São Paulo. In: INTERNATIONAL CONFERENCE "GEOCHEMICAL EVOLUTION OF THE CONTINENTAL CRUST", Poços de Caldas, 1988. **Abstracts...** Poços de Caldas, 1988. P. 92-97.
- Meer, F. V. der. Spectral curve shape matching with a continuum removal CCSM algorithm. **International Journal of Remote Sensing**. v. 21, n. 16, p. 3179-3185, 2000.
- Pontual, S.; Merry, N.; Gamson, P. Spectral Interpretation Field Manual. 3.ed. [Austrália] : Ausspec International, 2008. 189 p. (**GMEX Guides for Mineral Exploration**, 1).