

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO
AO MAPEAMENTO MINERAL DO COMPLEXO
ALCALINO DE ITATIAIA

João Mariante Santana

Orientador: Prof. Dr. André Pires Negrão

Co-orientador: Me. Eduardo Ribeiro

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF 17-27)

SÃO PAULO
2017

John P. Mac Neely

John P. Mac Neely

Jose M. Santana

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo à minha família, que tanto me apoiou em meus caminhos, pesar de eu saber exatamente que eles não sabem exatamente o que eu estive fazendo nesses últimos 5 anos. Em especial, agradeço aos meus avós, pela leveza como levam a vida; meu pai, pela confiança em minhas empreitadas; e a minha mãe e minha irmã, as pessoas mais importantes da minha vida.

Agradeço imensamente ao meu orientador, André Pires Negrão. Procurava um orientador que transmitisse disposição, conhecimento e amor pelo aquilo que faz: descobri um grande amigo; Tenho que agradecer Teodoro Isnard, Eduardo Ribeiro (Toba), e ao Pedro Augusto (Porra), pela generosidade e disposição em me passar conhecimento. Agradeço, também, ao Isaac, do LMEV, e ao Samuca, pela paciência com minha completa leiguice nas diversas etapas em que estes foram requisitados. Ainda agradeço ao Julio Cauhy e ao Banana pela ajuda primordial em meu trabalho de campo: sem vocês, a viagem seria muito mais trabalhosa –e mais sem graça.

A Turma 56 inteira foi sensacional para mim... a Geologia proporciona situações em que a amizade e a intimidade com pessoas tão diferentes se faz necessária e natural. Não posso deixar de demonstrar meu carinho para: AIDS (lindão), Aleja e sua família (me deram comida e abrigo sem nem me conhecer), Bandida (parceiro de vagabundagem), Murta, e sua cópia oceanográfica, Eunuco (parceiros de viagem), Mãe Loka (coração enorme), Xica (apesar de não gostar de abraços), Garibaldo (amiga de todas as horas), Maria (esposa daqui 17 anos), Bigode (apesar de não ter voltado da Austrália), Kreuza (acabou a tremedeira), Furunkinha, Porca, Ympa, , Peps, Pinga, Wesley, Belo, Sarjeta Gorfo e todo mundo que deixou minha vivência no IGc uma experiência ainda prazerosa.

Agradeço ao time de Vôlei da Geologia. Um time perdedor, formado por excelentes atletas, como o nosso, é algo raro de se ver! Piriguete, Molestado, Pink, Ariadna, Lelek, Cu de Mel, Paul de Selfie, Pepeu, Arregão, Pedrita, Paul, Malcriado e Mozo: se possível fosse, jogaria com vocês para sempre.

Tive uma sorte imensa, por toda a graduação anos, de morar na República Grauvaca. Um antro de gente louca e imbecil –como eu. Fedida e Pika (unidos desde o princípio), Bambi (mestre dos ovos), Navara (e suas conversas filosóficas), Dipe (o tiozão da casa) e todos os demais que já motivaram cartinhas de reclamação vindas do 87-C... obrigado por tudo.

É de se admirar o trabalho de todos os funcionários da Geologia USP. Desde o corpo docente, formado por pesquisadores de ponta, aos técnicos, os motoristas, os porteiros, as faxineiras...enfim: obrigado por fazerem dessa faculdade –apesar dos pesares- uma instituição de excelência.

Que este ciclo, que está para acabar, seja procedido de outros, gratificantes e significativos, como este foi para mim.

SUMÁRIO

1. RESUMO.....	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUÇÃO.....	3
4. OBJETIVOS	4
5. MATERIAIS E MÉTODOS	4
5.1. Revisão Bibliográfica.....	5
5.2. Imagens Digitais.....	5
5.2.1. Imagem Aster.....	5
5.2.2. Modelo Digital de Elevação (MDE).....	6
5.3. Softwares	6
5.4. Trabalho de Campo.....	6
5.5. Preparação de Amostras.....	7
5.5.1. Seções Delgadas.....	7
5.5.2. MEV e EDS.....	7
5.6. Petrografia	8
5.7. Espectrometria	8
6. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	9
6.1. Geologia Regional.....	9
6.2. Geologia Local	10
6.3. Minerais de alteração superficiais no Complexo de Itatiaia	12
6.4. Técnica de Fraser e Green.....	13
6.5. Espectroscopia de Reflectância Hiper-Espectral dos Minerais	13
7. RESULTADOS OBTIDOS.....	13
7.1. MEV e EDS	13
7.1.1. Amostra 05.....	14
7.1.2. Amostra 33.....	15
7.2. Processamento de Imagens.....	16
7.3. Espectrometria	20
7.4. Petrografia	21

7.5.	Dificuldade Encontradas e Alterações nos Objetivos Iniciais	23
7.5.1.	Difração de Raios X	23
7.5.2.	MEV e EDS	23
7.5.3.	Processamento de Imagens	23
8.	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	23
8.1.	MEV e EDS	24
8.2.	Espectros Amostrados	24
8.3.	Processamento de Imagens Após a Espectrometria	28
9.	CONCLUSÕES.....	31
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

Figura 1:	Localização geográfica da área de estudo.....	4
Figura 2:	Localização dos pontos amostrados durante o campo.....	7
Figura 3:	Foto da câmara de amostras MEV com EDS pertencentes ao LMEV	8
Figura 4:	Foto das amostras 05 (esquerda) e 33 (direita) recobertas de carbono	8
Figura 5:	Foto do espectrômetro portátil FieldSpec 3™, utilizado no projeto	9
Figura 6:	Localização aproximada do CAI (em vermelho) na Faixa Ribeira.....	9
Figura 7:	Esboço de mapa geológico do Complexo de Itatiaia.....	11
Figura 8:	Mapa geológico do CAI	11
Figura 9:	Perfil sintético de bauxita formada in situ sobre rochas alcalinas	12
Figura 10:	Imagem de alta resolução da amostra 05	14
Figura 11:	Imagem de alta resolução da amostra 05	14
Figura 12:	Mapas dos principais elementos químicos da amostra 05	15
Figura 13:	Imagem de alta resolução da amostra 33.....	15
Figura 14:	Imagem de alta resolução da amostra 33.....	16
Figura 15:	Mapas dos principais elementos químicos da amostra 33	16
Figura 16:	Espectro reamostrado de caulinita para a resolução espectral do ASTER.....	17
Figura 17:	Espectro reamostrado de gibsita para a resolução espectral do ASTER	17
Figura 18:	Realce da caulinita na área de estudo produzido pela razão de bandas ASTER.....	18
Figura 19:	Realce da gibsita na área de estudo produzido pela razão de bandas ASTER.....	18
Figura 20:	Realce da vegetação na área de estudo produzido pela razão de bandas ASTER	19

Figura 21: Mapa de abundância de caulinita na área de estudo -----	20
Figura 22: Espectros coletados de todas as amostras na faixa entre 350-2500 nm -----	21
Figura 23: Espectro de todas as amostras medidas -----	21
Figura 24: Fotomicrografias representativas das porções alteradas de feldspato alcalino no planalto do PNI-----	22
Figura 25: Fotomicrografias representativas das porções alteradas de feldspato alcalino no planalto do PNI-----	22
Figura 26: Espectros com alguns minerais que apresentam vales de reflectância -----	25
Figura 27: Espectro de alguns minerais com feições de absorção próximos a 2200 nm-----	26
Figura 28: Espectro superficial da amostra -----	27
Figura 29: Série de espectros fornecidos pela biblioteca espectral do próprio software Envi -----	27
Figura 30: Espectros reamostrados para resolução espectral ASTER -----	28
Figura 31: Espectros reamostrados para resolução espectral ASTER de ilita-----	29
Figura 32: Realce de ilita na área de estudo, produzido pela razão de bandas ASTER-----	29
Figura 33: Mapa de abundância de ilita na área de estudo -----	30
Figura 34: Composição colorida entre ilita, minerais de alteração supergênica e vegetação-----	31
Figura 35: Mapa similar ao da figura 34, porém com limites litológicos -----	32

1. RESUMO

O mapeamento mineral através de técnicas de sensoriamento remoto é comum tanto para trabalhos acadêmicos quanto para projetos de prospecção mineral. Neste projeto, procurou-se delimitar as regiões de abundância dos principais minerais da superfícies das rochas aflorantes do Complexo Alcalino de Itatiaia, na região do Planalto do Itatiaia, MG-RJ.

Contando com imagem digital ASTER da região, procurou-se processar a imagem com auxílio tanto da bibliografia acerca da região quanto com dados espectrométricos, petrográficos e de microscopia eletrônica de varredura. A principal técnica utilizada para o destaque dos minerais pela imagem digital foi a técnica de Fraser e Green, que reduz significativamente a influência da vegetação nos dados geológicos.

O espectro mais comum detectado pelo espectrômetro de campo foi interpretado como sendo da illita, corroborando os mapas feitos com o processamento de imagem, que mostram uma forte influência espectral de argilominerais. Outro dado relevante é de que as mudanças litológicas na área não influenciam na abundância dos minerais de alteração.

2. ABSTRACT

The mineral mapping through remote sensing techniques is common for academic works and also for mineral prospecting works. In this project, the goal was to delimit the regions of abundance of the main minerals of the surfaces of the outcropping rocks of the Itatiaia Alcalin Complex, in the Itatiaia Plateau region, MG-RJ.

With an ASTER digital image of the region, we looked for processing this image with the aid of bibliography of the region as well as with spectrometric, petrographic and scanning electron microscopy data. The main technique for mineral highlighting with digital image were the Fraser and Green technique, which significantly reduces an influence of vegetation on the geological data.

The most common spectrum detected by the field spectrometer was interpreted as being of the illite, corroborating the maps made with the image processing, which show a strong spectral influence of clay minerals. Another relevant fact is that as literary changes in the area do not influence the abundance of the altering minerals.

3. INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto tem como exigência, para obtenção de imagens da superfície terrestre, a ausência de matéria entre o objeto e o sensor. Para tanto, a detecção e medição quantitativa das respostas deve ser obtidas por meio das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (Meneses e Almeida, 2012).

Rodrigues (1981) publicou o primeiro trabalho tentando fazer relações geológicas acerca do complexo alcalino de Itatiaia a partir do uso de imagens orbitais. Devido à tecnologia da época, onde as imagens possuíam baixa resolução espacial e espectral, conseguiu realçar os lineamentos da localidade, bem como as regiões com áreas sedimentares, porém sem obter distinção entre as associações minerais (litologias) existentes.

A exemplo de trabalhos como os de Crósta *et al.* (2003) e Guha *et al.* (2013), o emprego de imagens multiespectrais em áreas com potencial econômico mineral, para, através do processamento destas, identificar e estabelecer zonas superficiais de ocorrências minerais (minerais de minério, argilominerais, produtos de alteração da mineralogia original etc.), é recorrente.

Diversas técnicas de análise de imagem digital são concebidas utilizando assinaturas espectrais medidas em laboratório, como por exemplo, a biblioteca espectral do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Porém, as informações contidas nestas bibliotecas espectrais modelos não representam exatamente os espectros do campo em questão, devido a diversos fatores incontroláveis que acabam por deixar as condições de campo diferentes das laboratoriais (Gabr *et al.*, 2010). Portanto, a realização de espectrometria em amostras pertencentes à área de estudo é relevante para a orientação do processamento de imagens deste projeto.

A área de estudo (Fig. 1) está localizada na divisa entre os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, próximo ao estado de São Paulo, na Serra da Mantiqueira. É na região do Planalto do Itatiaia, também conhecida como Parte Alta, com campos de altitude e vales suspensos, onde se encontram os afloramentos rochosos alvos deste projeto.

Na região Sul Fluminense, também conhecida como Região das Agulhas Negras, o Complexo Alcalino de Itatiaia abrange os municípios de Itatiaia e Resende. Já no sul de Minas Gerais, abrange parte dos municípios de Itamonte e Bocaina de Minas.

O Parque Nacional do Itatiaia (PNI), onde aflora o complexo alcalino, situa-se geograficamente entre os paralelos 22°19' e 22°45' latitude sul e os medianos 44°15' e 44°50' de longitude oeste.

Para chegar a Parte Alta do Parque Nacional do Itatiaia, onde se encontram os afloramentos rochosos alvos deste estudo, deve-se seguir pela Rodovia Presidente Dutra (BR

116) até o distrito de Engenheiro Passos, 12 Km depois de Itatiaia. Seguir, então, pela BR 354, na estrada Rio-Caxambú (Circuito da Águas) por 26 Km, até o local conhecido como Garganta do Registro, a 1.669 metros de altitude. Por fim, há uma estrada de 14 km até o Posto Marcão (antigo Posto 3), que dá acesso ao sítio de estudo.

O estudo proposto visa o mapeamento de minerais de alteração supergênica do maciço. Para tanto, utilizou metodologias de sensoriamento remoto atualizadas, levantamento de campo para caracterização espectral de amostras com o uso de espectrômetro de campo Fieldspec 3™, identificação dos minerais mais próximos à superfície das exposições rochosas por meio de petrografia e também com o auxílio do espectrômetro.



Figura 1: Localização geográfica da área de estudo. Fonte: Google Maps (2017).

4. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é o mapeamento dos minerais de alteração supergênica da Parte Alta do Parque Nacional do Itatiaia, contida no complexo alcalino de Itatiaia, por meio do processamento de imagem digital da área. Trata-se de um projeto metodológico, por testar a eficácia do processamento de imagens, comparando os resultados obtidos por este método com dados gerados em análises laboratoriais de amostras coletadas na área de estudo

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho de formatura foi realizado em 5 etapas principais, iniciada com aquisição de imagens digitais da área de estudo, seguida pelo levantamento de campo e obtenção de amostras, seguida pela preparação de amostras para a petrografia, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), seguida pela espectrometria das amostras e, por último, seguida pelas descrições petrográfica das amostras e obtenção

dos dados de MEV e EDS, com a revisão bibliográfica e o processamento de imagem concomitante com todas as etapas.

5.1. Revisão Bibliográfica

Foram compilados artigos e teses existentes sobre a área de estudo e sobre métodos e técnicas de sensoriamento remoto que pudessem ser empregadas na área. A busca das referências para essa pesquisa foi realizada na Biblioteca do IGC-USP e nos sistemas de buscas de dados do Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade de São Paulo (SIBi/USP), que inclui as bases de dados DEDALUS, SciELO, ERL, ProBE e Web of Science, e no Portal CAPES.

5.2. Imagens Digitais

As imagens da área de estudo foram obtidas através do site 'earthexplorer.usgs.gov', pertencente ao Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS).

5.2.1. Imagem Aster

O ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) é uma das cinco plataformas à bordo do satélite TERRA e faz parte do Sistema de Observação da Terra – Earth Observing System (EOS). O ASTER é uma parceria entre a NASA, o Ministério da Economia do Japão (METI), o Instituto de Ciências Avançadas do Japão (AIST) e a Agência Espacial Japan Space Systems (J-spacesystems). As imagens ASTER são geradas com o intuito de contribuir para diversas áreas de estudo relacionadas às mudanças globais detectáveis na superfície terrestre, como as dinâmicas dos ecossistemas, geologia, solos, hidrologia etc.

Os dados ASTER são os mais utilizados para exploração geológica da última década, especialmente pelas informações espectrais de seus canais no SWIR. Neste intervalo, diversos minerais de alteração exibem assinaturas espectrais diagnósticas (Rowan e Mars, 2003).

ASTER tem sido utilizado extensivamente para mapear zonas de alterações associadas a depósitos hidrotermais ou para mapear litologias específicas para diferentes partes do mundo (Bedini, 2011; Crósta e Filho, 2003; Gabr *et al.*, 2010; Galvao *et al.*, 2005).

O ASTER possui 14 bandas espectrais, sendo 3 na faixa de comprimento de ondas do visível e do infravermelho próximo, VNIR (0,52 - 0,86 μm), com resolução espacial de 15 m; 6 bandas na fração do SWIR (1,6 – 2,43 μm), com resolução espacial de 30 m; e 5 bandas no segmento espectral do infravermelho termal, TIR (8,125 – 11,65 μm), com resolução espacial de 90 m (Abrams, 2000).

5.2.2. Modelo Digital de Elevação (MDE)

De modo a complementar as análises multiespectrais e dos levantamentos de campo, integrou-se a este estudo análises de modelos digitais de elevação, com a finalidade de se estabelecer, principalmente, correspondências entre morfoestruturas e feições espectrais.

Adotou-se o modelo digital de elevação produzido pela NASA em parceria com a Agência de Defesa de Inteligência Geoespacial (NGA) em sua missão SRTM (Shutter Radar Topographic Mission), cuja resolução espacial é de 30m/pixel, compatível com a escala de trabalho deste projeto.

5.3. Softwares

Os programas computacionais utilizadas para o processamento de dados foram o *Envi*™5.3 (para sensoriamento remoto e leitura de dados espectrométricos); *ArcGIS*™10.2.2 e *QGIS*™2.16.3 (geoprocessamento), ambos disponíveis no Laboratório de Informática Geológica (LIG).

5.4. Trabalho de Campo

Entender a assinatura espectral dos minerais das superfícies rochosas da área de estudo é um dos principais aspectos do projeto, por isso, faz-se importante a amostragem das superfícies rochosas expostas na área (Fig. 2), algo também feito em trabalhos de Guha et al. (2012). Adicionalmente a espectrometria, outras técnicas de análise foram realizadas, para melhor caracterizar a composição da superfície dos afloramentos e a influência das variações litológicas na distribuição dos principais minerais de alteração.

Como pode-se observar na Figura 2, as amostras coletadas em campo tem sua distribuição atrelada a dificuldade de acesso, principalmente o quão longe das trilhas principais os afloramentos se encontravam, e a quantidade de vegetação que se dispunha na superfície. Foi coletado um total de 33 amostras para análises de espectrometria, MEV, EDS e petrografia, entre os dias 11 e 15 de julho.

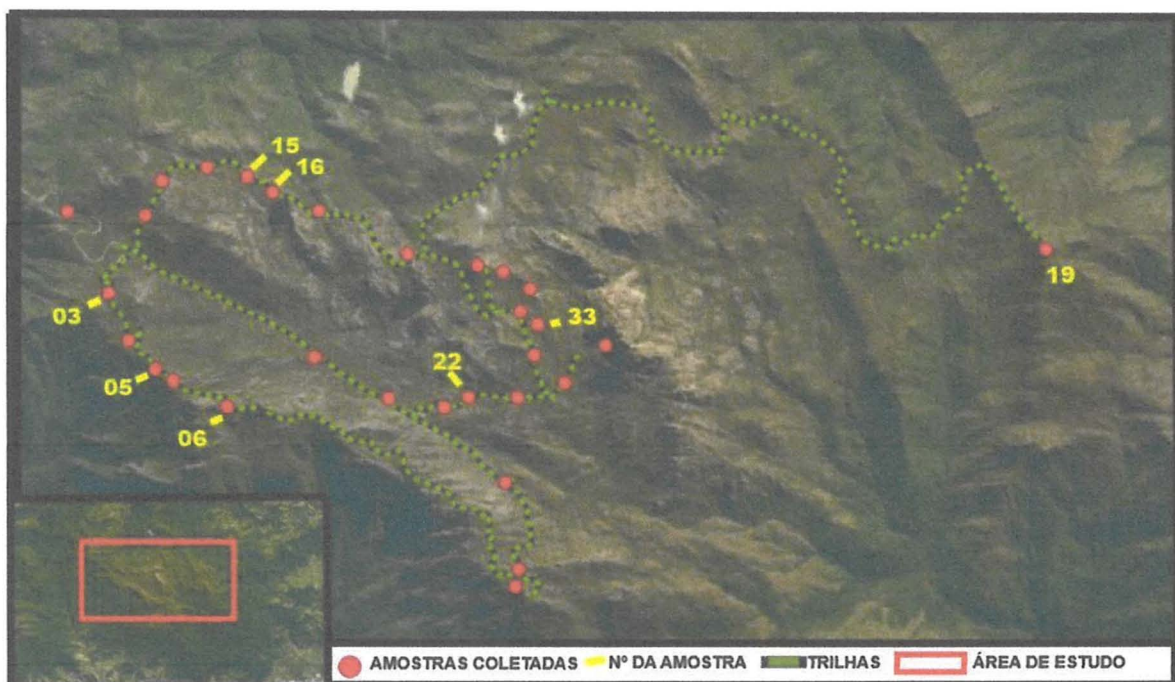


Figura 2: Localização dos pontos amostrados durante o campo. Em amarelo estão os números das amostras citadas ao longo do texto Fonte: Google Maps (2017).

5.5. Preparação de Amostras

5.5.1. Seções Delgadas

Para este estudo, a escolha das amostras tentou abranger o maior número de variações litológicas, baseando-se nas delimitações feitas por Rosa (2017, no prelo). Os planos de corte escolhidos visaram abranger tanto a capa de alteração das rochas, quanto a porção fresca das mesmas.

Após a seleção, as amostras foram encaminhadas para a seção de laminação do IGC-USP, onde foram confeccionadas 9 seções delgadas com lamínula.

As fotomicrografias foram feitas no LabPetro (Laboratório de Petrografia Sedimentar), nos microscópios Leica DM750 P e AX2, utilizando o *software* LAS.

5.5.2. MEV e EDS

Neste estudo, 2 amostras contendo porções intemperizadas e inalteradas foram destinadas ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LMEV) (Figuras 3 e 4), com MEV de modelo *Leo 440i™* e EDS modelo *Oxford™*.

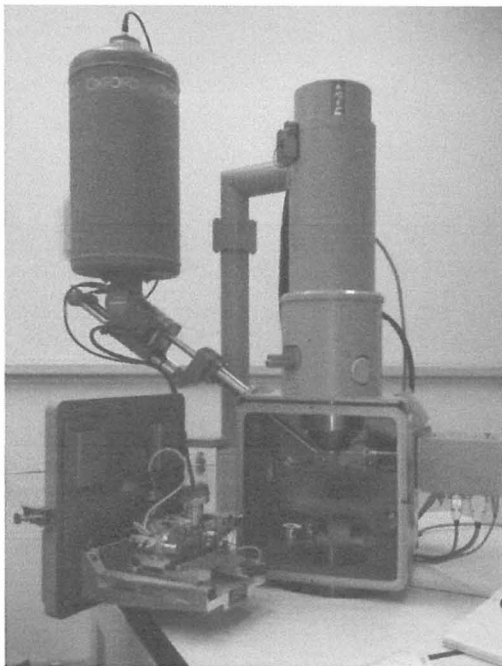


Figura 3: Foto da câmara de amostras MEV com EDS pertencentes ao LMEV.

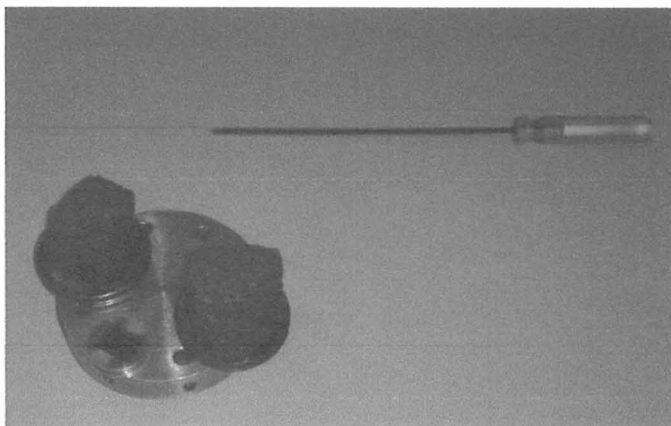


Figura 4: Foto das amostras 05 (esquerda) e 33 (direita) recobertas de carbono.

5.6. Petrografia

As descrições petrográficas foram feitas no Laboratório Didático de Microscopia Petrográfica (LDMP).

5.7. Espectrometria

A coleta dos espectros foi realizado com o espectrômetro portátil FieldSpec 3™, cedido pelo IGC-USP (Figura 5). Os alvos foram as superfícies de topo das amostras, pois estas representam as facetas que influenciaram na composição da imagem digital adquirida. No total, a biblioteca espectral criada contou com 36 medidas realizadas no topo das amostras



Figura 5: Foto do espectrômetro portátil FieldSpec 3™, utilizado no projeto.

6. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

6.1. Geologia Regional

O CAI tem como encaixante a Faixa Ribeira (Figura 6), cuja origem está relacionada ao ciclo orogênico Brasileiro. Na área de estudo o embasamento é agrupado em complexos ortoderivados do Paleoproterozoico, complexos de paragnáisses neoproterozoicos e suítes intrusivas do Neoproterozoico/Eopaleozoico, vinculadas aos terrenos da Klippe Paraíba do Sul, Ocidental e Embu (Heilbron et al., 2017). De maneira sistemática, estas unidades do embasamento ocorrem sob a forma de corpos estirados, de direção NE-SW, seguindo o *trend* regional da Faixa Ribeira.

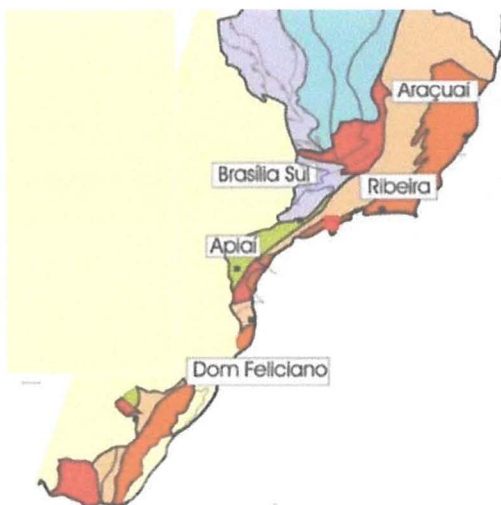


Figura 6: Localização aproximada do CAI (em vermelho) na Faixa Ribeira e outras faixas móveis que compõem o Sistema Orogrênico Mantiqueira. Fonte: Heilbron et al., 2004.

6.2. Geologia Local

Enrich *et al.* (2005) cita Derby (1887) como o primeiro a descrever a geologia dos nefelina sienitos do CAI. Trabalhos científicos posteriores na área focaram principalmente na caracterização geológica e petrográfica do CAI (Ribeiro Filho, 1967; Penalva, 1967). Ainda segundo Enrich *et al.* (2005), as primeiras datações geocronológicas utilizando K-Ar para a região foram feitas por Ribeiro Filho e Cordani (1966) e posteriormente por Amaral *et al.* (1967), recalculadas utilizando novas constantes de decaimento para o método K-Ar por Sonoki e Garda (1988) e compiladas por Brotzu *et al.* (1997).

O Complexo Alcalino de Itatiaia é uma intrusão neocretácea, com datações K-Ar indicando idade de $70,5 \pm 3,3$ Ma, segundo Montes-Lauar *et al.* (1995) e 72 ± 6 Ma, segundo (Brotzu *et al.*, 1997). Possui formato elipsoide com uma área de aproximadamente 220 km² e com altitude máxima de 2787 m (Pico das Agulhas Negras). Sua origem seria consequência de diferenciações félsicas, com rochas sieníticas (predominantemente) e a presença de variedades ricas tanto em nefelina quanto em quartzo. As rochas estão dispostas concêntricamente (Fig. 7), com o núcleo do complexo sendo formado por sienitos supersaturados em sílica, com uma ocorrência granítica em sua porção central (Brotzu *et al.*, 1997).

Há duas ocorrências de diques máficos cortando os sienitos (Thompson *et al.*, 1998), além da presença de diques com composição fonolítica ou traquítica cortando as fácies de maior granulação (Brotzu *et al.*, 1997).

A mineralogia demonstra uma mudança na composição, como piroxênios mais ricos em cálcio gradando para piroxênios sódicos, e feldspatos mais ricos em sódio mudando para composições mais potássicas, ao longo do corpo. Além disso, a disposição geral das rochas é amplamente consistente com processos de cristalização fracionada dominados pela remoção dos feldspatos alcalinos (Brotzu *et al.*, 1997).

Segundo Rosa (2017, no prelo), o maciço evoluiu consoante a um centro magmático, que migrou de sudeste para noroeste, com sucessivas intrusões similares ao formato de meia lua, e que podem ser divididas em 3 setores, com qualidades litológicas e geomorfológicas que diferem entre si (Fig. 8).

6.3. Minerais de alteração superficiais no Complexo de Itatiaia

O CAI encontra-se na Província Bauxífera do Sudeste do Brasil, junto com outros complexos alcalinos como os de Passa Quatro (MG), Morro Redondo (RJ), Poços de Caldas (MG) e as intrusões alcalinas de Lajes (SC). (Kotschoubey, 1988).

As ocorrências e os depósitos de bauxita na região Sudeste do Brasil tem origem autóctones, relacionados à alteração intempérica. Além de alterações químicas, como a ferralitização e a aluminização, ocorrem, secundariamente, retrabalhamentos mecânicos parciais com redistribuição e transporte a curtas distâncias, dos produtos de fragmentação física ou química. (Kotschoubey, 1988).

A bauxita, o principal minério empregado para a produção de alumínio, trata-se de um grupo de rochas fortemente aluminosas com grandes variações de consistência, textura e estrutura. Os três principais minerais que podem compor a bauxita são: a gibbsita (hidróxido de alumínio), boemita e o diásporo (mono-hidratos de alumínio). Os minerais comumente associados à bauxita são: caulinita e haloisita (silicatos de alumínio), hematita e goetita (óxidos e hidróxidos de ferro) (Kotschoubey, 1988).

Segundo Kotschoubey (1988), o perfil bauxítico sobre rochas alcalinas (Fig. 9), como as do Complexo de Itatiaia, varia de acordo com a eficiência de drenagem do local, ou seja, muda de acordo com a topografia. Quanto maior a declividade, maior a camada de bauxita e mais rápida a transição da rocha fresca para ela. Já em zonas mais planas, a lixiviação incompleta leva a uma maior formação, relativa, de argilominerais, principalmente a caulinita.

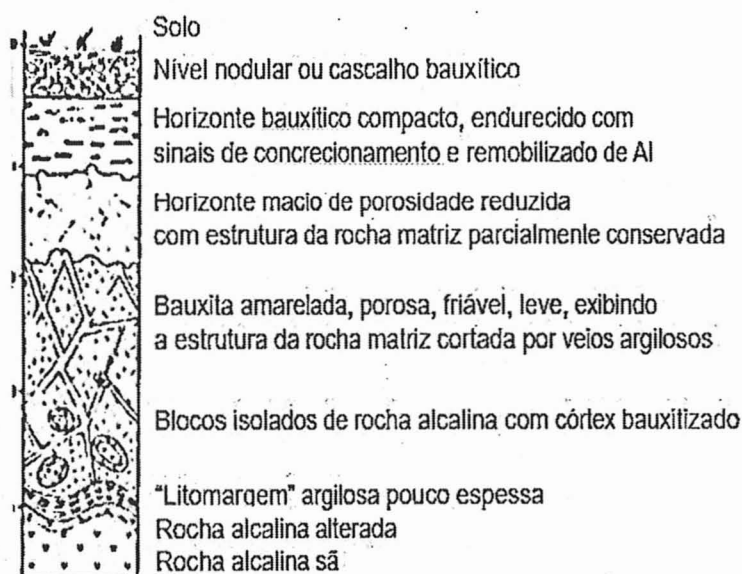


Figura 9: Perfil sintético de bauxita formada in situ sobre rochas alcalinas. Fonte: Kotschoubey (1988).

6.4. Técnica de Fraser e Green

A vegetação impede uma análise geológica acurada das imagens por razão de banda, tanto por estar amplamente distribuída na superfície terrestre quanto por possuir similaridade espectral com certos óxidos e argilas, em imagens digitais com extensão ampla (Fraser e Green, 1987). Uma forma de se contornar este problema é através do emprego da técnica de Fraser e Green.

A técnica de Fraser e Green utiliza a análise de principais componentes (APC) entre uma razão que realça uma característica geológica desejada, mas sofre interferência da vegetação e uma razão de banda que realce a própria vegetação. Uma vez computada, o segundo componente principal (CP2) terá as propriedades da discriminação geológica, porém substancialmente menos influenciado pela vegetação.

6.5. Espectroscopia de Reflectância Hiper-Espectral dos Minerais

Na região da luz solar refletida (300-3000 nm), muitos minerais apresentam feições de absorção diagnósticas devido a implicações vibracionais, transições de elétrons, transferência de cargas elétricas e processos de condução (Clark *et al.*, 1990).

No artigo de Clark *et al.* (1990), uma série de feições de absorção espectral, comuns em diversos minerais, são diagnósticas de ligações químicas específicas. Por exemplo, feições de absorção em 1400 nm e 1900 nm são típicos de minerais hidratados. Em minerais em que há ligação entre metais e hidroxila, feições de absorção aparecem entre 2200 e 2300 nm.

De acordo com Clark (1999), há uma série de motivos que levam ao espalhamento dos espectros, que apesar tornar a espectroscopia de reflectância possível, também pode levar a um aumento do nível de complexidade interpretacional.

Por exemplo, a granulometria e a abundância de um mineral na superfície medida influenciam a forma dos espectros. Uma superfície composta por dois minerais, com um deles tendo assinatura espectral com um trecho de absorção de profundidade D. Conforme a abundância do segundo material aumenta, a profundidade da absorção D, do primeiro mineral, irá diminuir. Além disso, conforme se aumenta a granulometria do mineral com trecho de absorção espectral, D irá primeiro crescer, alcançar seu máximo e depois, diminuir.

7. RESULTADOS OBTIDOS

7.1. MEV e EDS

A seguir, as imagens e informações derivadas das amostras 05 e 33. As análises quantitativas dos íons dos elementos Na, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Mn e Fe estão presentes no

Anexo 1. Os estudos foram realizados tanto nas superfícies inalteradas quanto nas intemperizadas, objetivando comparações entre as regiões.

7.1.1. Amostra 05

As Figuras 10 e 11 são das imagens de alta resolução da superfície da amostra. Na Figura 11, há um contraste entre a porção da amostra, não intemperizada, e a porção intemperizada. A figura 12 mostra a abundância dos principais elementos químicos constituintes da amostra.

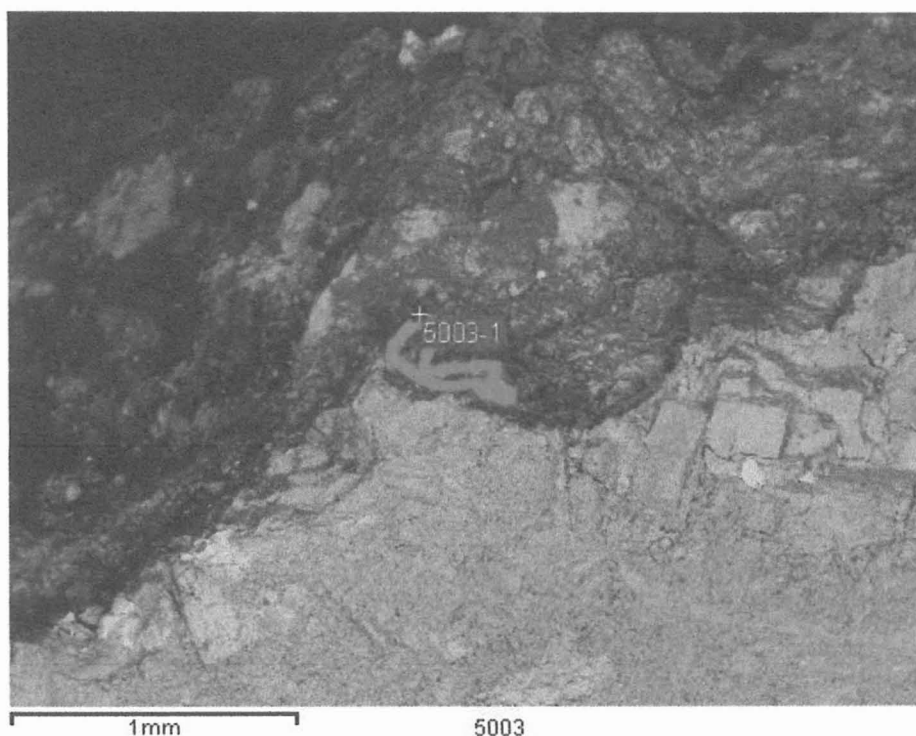


Figura 10: Imagem de alta resolução da amostra 05 com trecho selecionado para mapeamento químico..

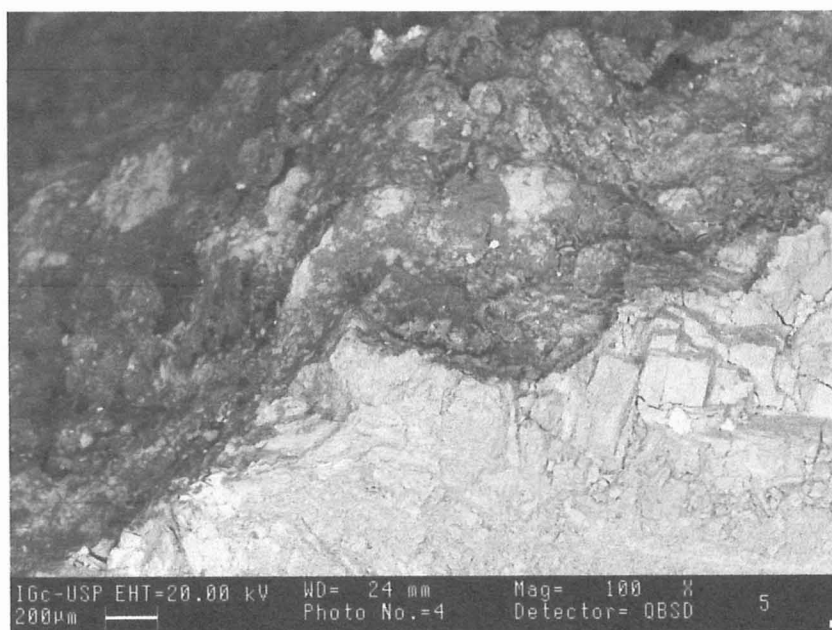


Figura 11: Imagem de alta resolução da amostra 05, com contraste entre a porção não alterada da amostra (região mais clara) e a porção alterada da mesma (região mais escura).

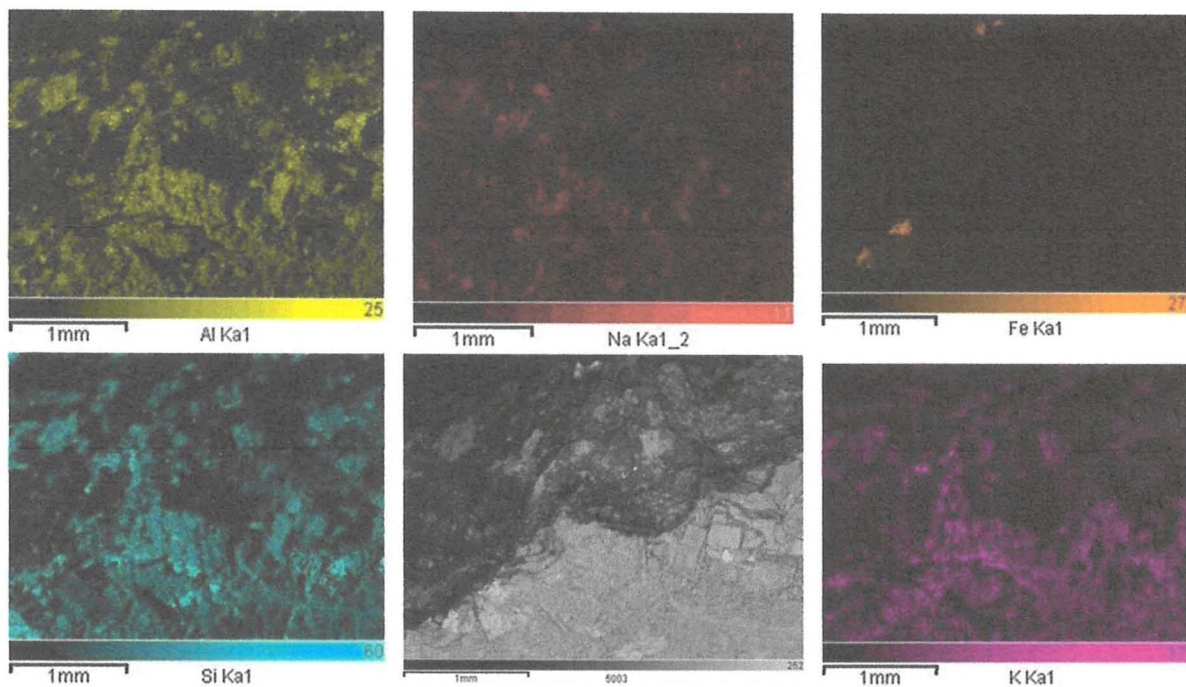


Figura 12: Mapas dos principais elementos químicos da amostra 05: Al (amarelo), Na (vermelho), Fe (laranja), Si (azul) e K (roxo).

7.1.2. Amostra 33

As figuras 13 e 14 são das imagens de alta resolução da superfície da amostra. Na figura 14, há um contraste entre a porção da amostra, não intemperizada, e a porção intemperizada. A figura 15 mostra a abundância dos principais elementos químicos constituintes da amostra.

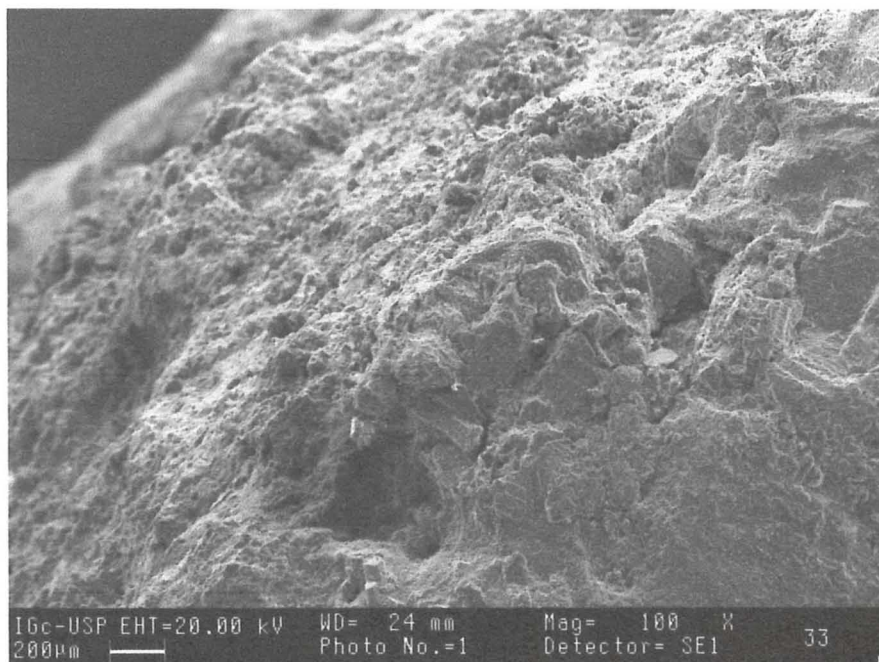


Figura 13: Imagem de alta resolução da amostra 33

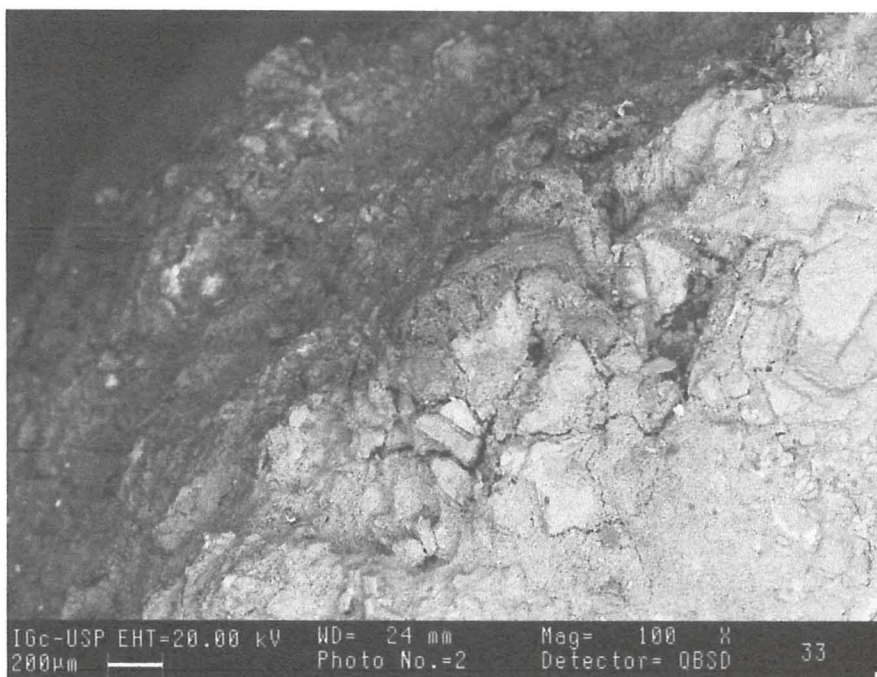


Figura 14: Imagem de alta resolução da amostra 33, com contraste entre a porção não alterada da amostra (região mais clara) e a porção alterada da mesma (região mais escura).

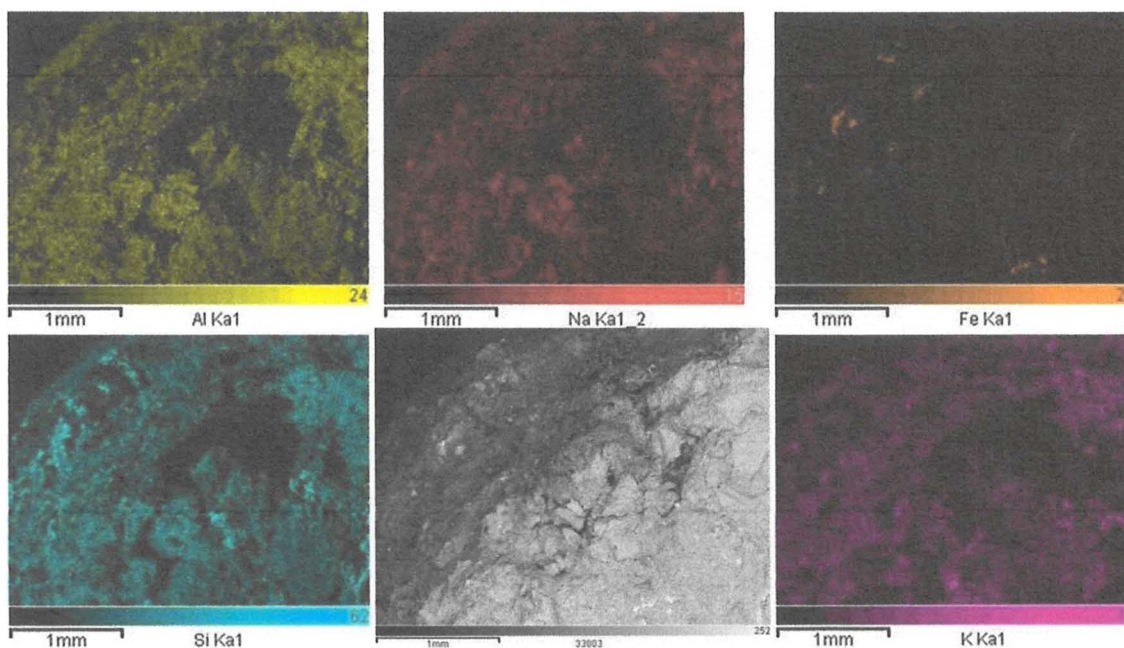


Figura 15: Mapas dos principais elementos químicos da amostra 33: Al (amarelo), Na (vermelho), Fe (laranja), Si (azul) e K (roxo).

7.2. Processamento de Imagens

O comportamento dos espectros de minerais de alteração, reamostrados para a resolução espectral do ASTER pode ser compreendido com o auxílio das imagens da biblioteca espectral de Kokaly *et al*, 2017 (figuras 16 e 17). Com base na literatura, os minerais alvos escolhidos inicialmente para a área foram caulinita e gibbsita.

Para o destaque da caulinita, a melhor imagem (Figura 18) gerada pela técnica de razões de bandas foi feita com a banda 4 dividida pela banda 6. O espectro de reflectância da caulinita provê uma característica de dupla absorção Al-OH diagnóstica entre 2.17-2.20 micrômetros (Clark, 1999).

Utilizando a mesma técnica de realce, para a gibbsita, a melhor imagem (Figura 19) foi realizada com a banda 4 sendo dividida pela banda 7- onde há um vale de reflectância devido a uma notável banda vibracional da ligação Al-OH (Clark, 1999).

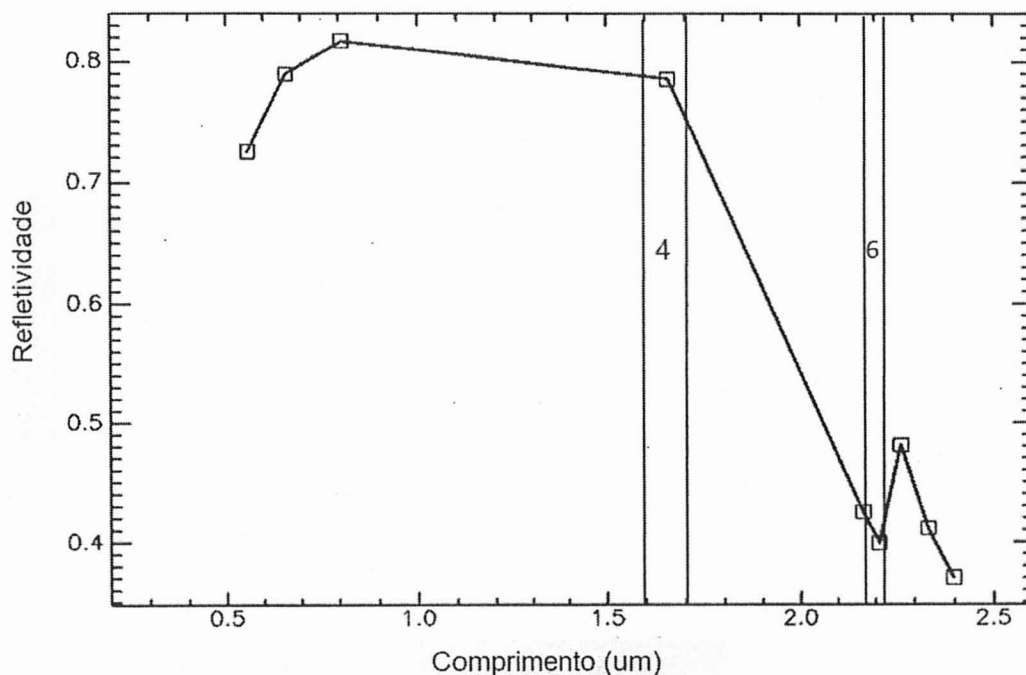


Figura 16: Espectro reamostrado de caulinita para a resolução espectral do ASTER. Fonte: Kokaly et al., 2017.

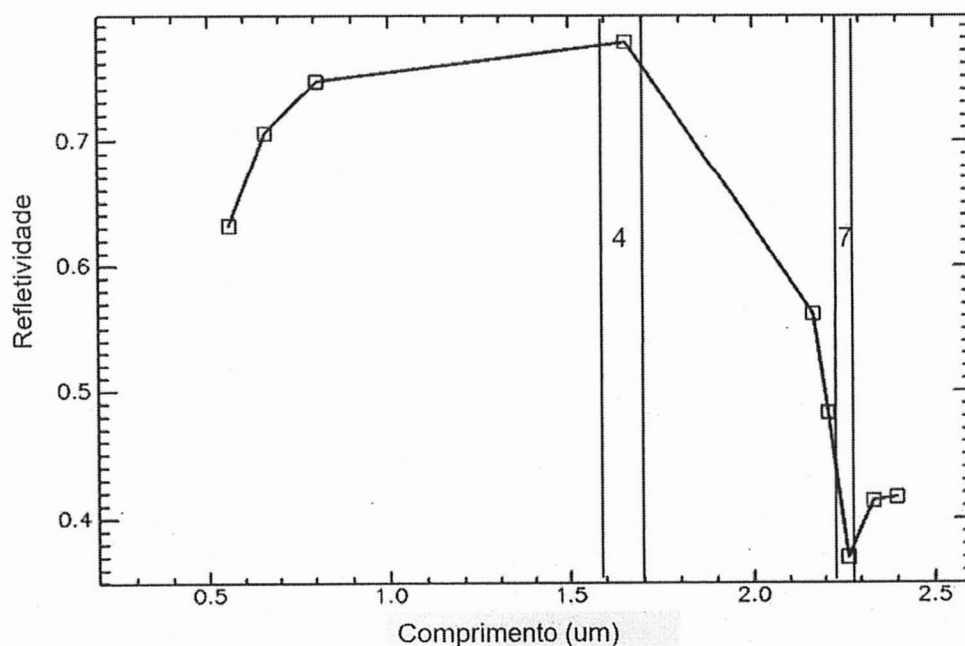


Figura 17: Espectro reamostrado de gibbsita para a resolução espectral do ASTER. Fonte: Kokaly et al., 2017.

7.5. Dificuldade Encontradas e Alterações nos Objetivos Iniciais

7.5.1. Difração de Raios X

Inicialmente, os minerais de alteração seriam também distinguidos com o uso da difração de raios X, porém, as amostras coletadas não continham argila suficiente para o uso deste método. Trocou-se, então, a técnica de reconhecimento dos minerais, para MEV.

7.5.2. MEV e EDS

A meta inicial para a microscopia eletrônica de varredura era a realização de análises em no mínimo 10 amostras coletadas em campo, porém alguns fatores minaram este intuito, dentre eles, os principais:

- O tamanho obtido para as amostras estava no limite do aceitável para as análises. Tamanhos menores permitiriam um maior número de amostras a serem feitas em uma menor quantidade de sessões;

- Uso concorrido dos serviços do LMEV levou a impossibilidade de agendar sessões de análise suficientes para suprir a meta inicialmente proposta de 10 amostras;

- Cancelamento imprevisto de uma das duas sessões agendadas, por impossibilidade do técnico do LMEV de poder comparecer ao instituto no dia, além da dificuldade em remarcar outra sessão dentro do prazo estabelecido para entrega deste projeto.

7.5.3. Processamento de Imagens

Este projeto tinha a ambição de também processar imagem digital *WordView 3™* (WV3) fornecida pela empresa *Digital Globe Foundation*, além da imagem ASTER. Para tanto, cumpriu-se uma série de requerimentos necessários para a permissão gratuitas das imagens WV3.

Após a aquisição destas, constatou-se a ausência de dados espectrais na região do SWIR (1400-3000 nm), justamente o intervalo de ondas eletromagnéticas que melhor propicia a identificação de assinaturas espectrais para minerais e rochas. Contatada, a empresa confirmou que seu produto não continha dados SWIR para a região, apesar deste requisito ter sido exigido pelos colaboradores deste projeto desde o início.

8. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Enquanto o processamento de imagens não contava com dados de campo, petrográficos e espectrométricos, os minerais alvos (caulinita e gibbsita) foram escolhido de acordo com a literatura sobre alteração supérgena de corpos alcalinos. Em adicional, a gibbsita possui uma importante feição de absorção na região da banda ASTER 7, e se este

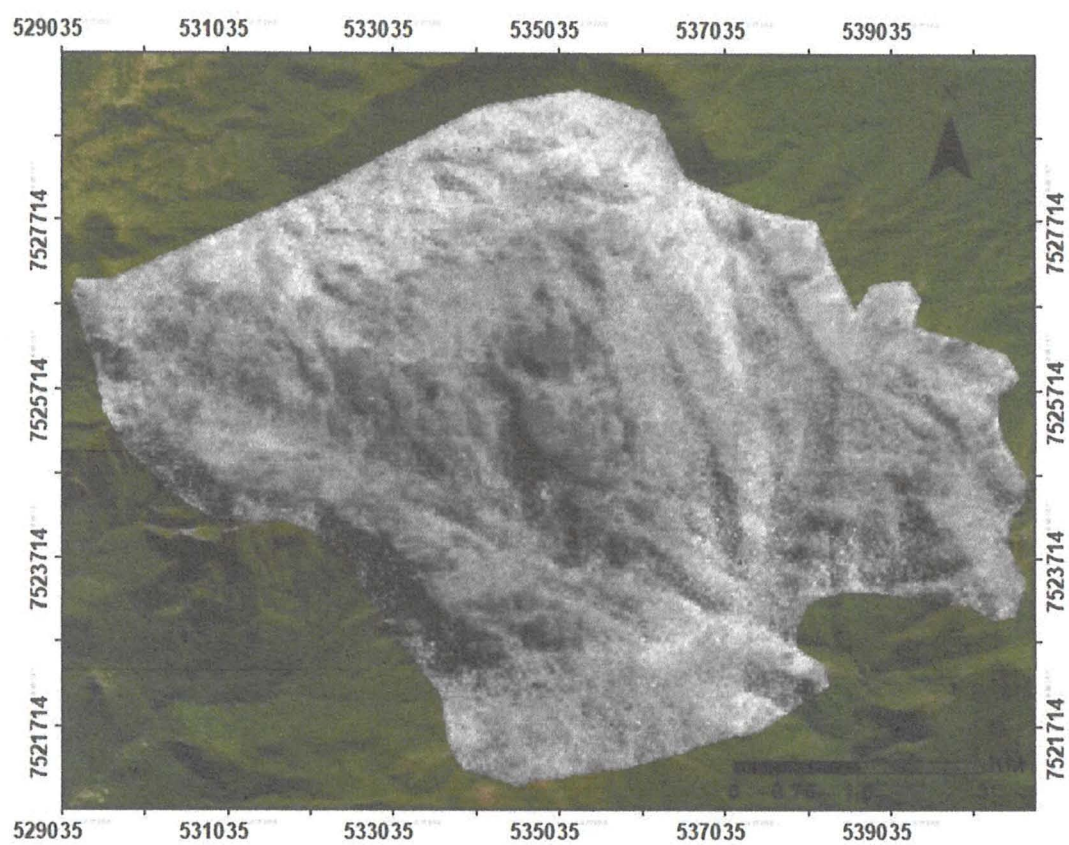


Figura 18: Realce da caulinita na área de estudo produzido pela razão de bandas ASTER

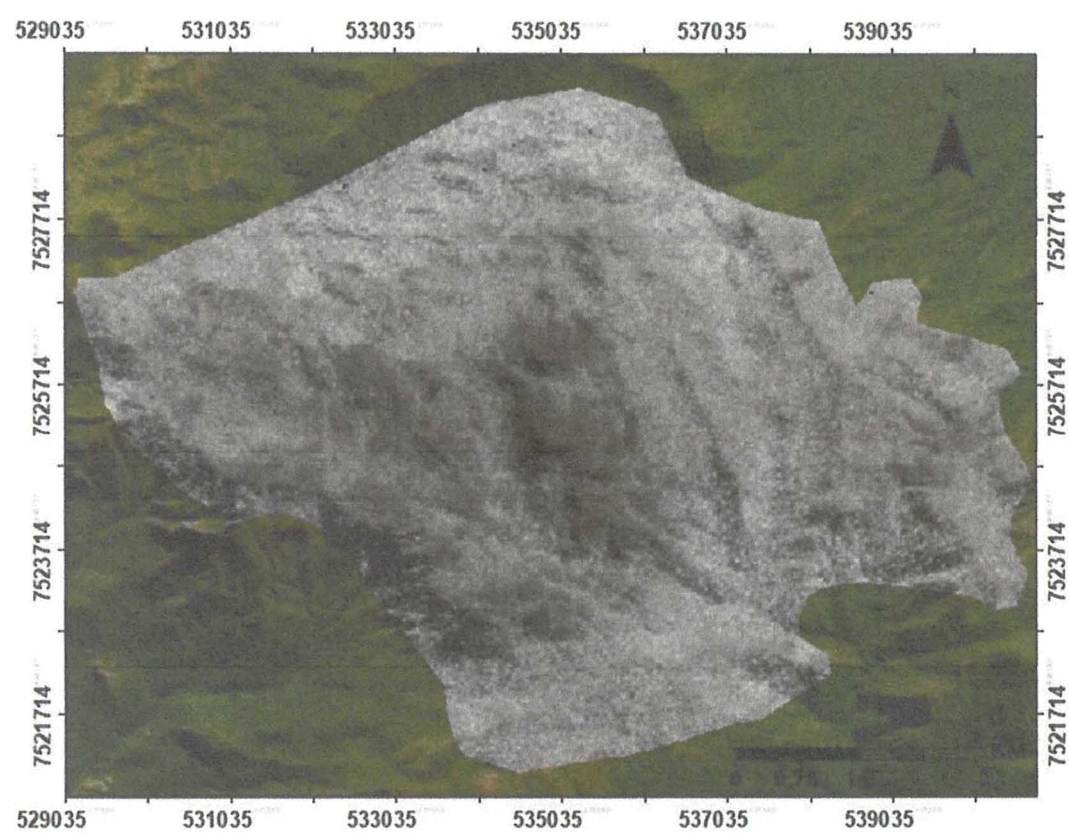


Figura 19: Realce da gipsita na área de estudo produzido pela razão de bandas ASTER.

Para a aplicação da técnica de Fraser e Green, visando a redução da influência da vegetação na discriminação geológica, APC foram feitas entre as razões de bandas já citadas e a razão das bandas ASTER 3 pela 2 (Figura 20), efetuada para destacar a vegetação.

Como pode ser visto na Tabela 1, este procedimento gerou CP1, contendo a maior parte das informações espectrais da vegetação local, e CP2, esta utilizada para destacar os minerais alvos (Fig.21). Porém, a APC feita para destacar a gibbsita gerou CPs que não condizem com o comportamento esperado para a técnica, visto que o maior valor, em módulo, para a razão de bandas ASTER 3 por 2 se encontra na CP2, quando deveria estar na CP1 (Tabela 2).

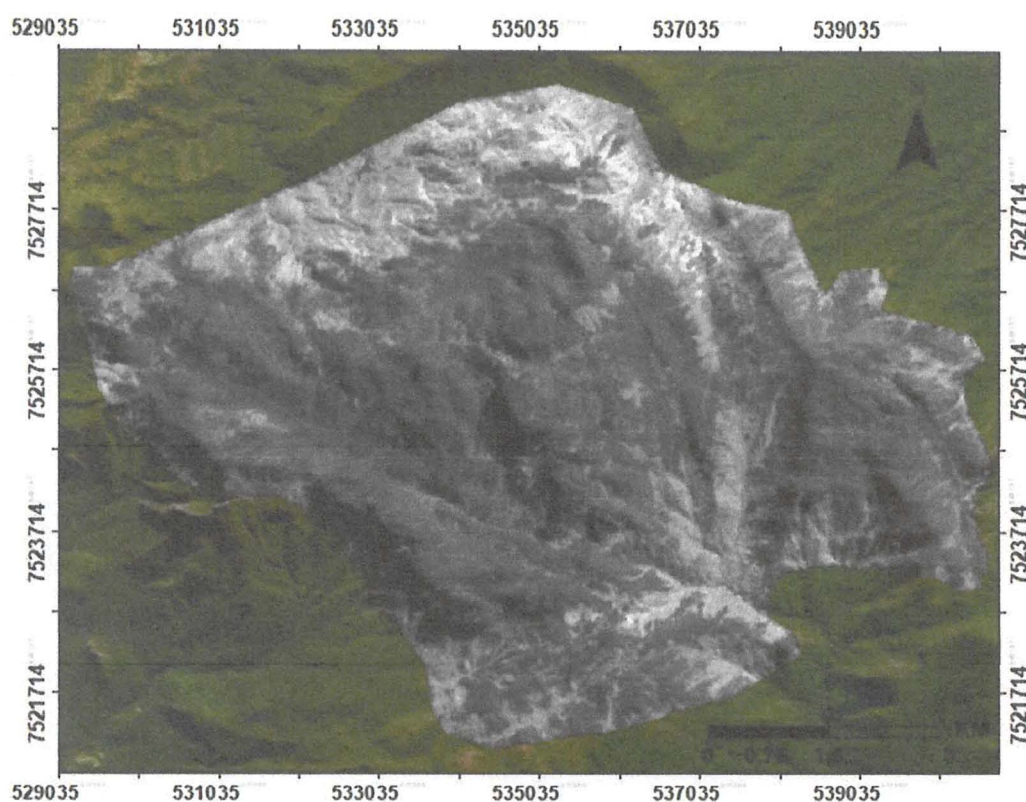


Figura 20: Realce da vegetação na área de estudo produzido pela razão de bandas ASTER. Quanto mais branco, maior a influência da vegetação.

Tabela 1: PCs entre as razões de bandas utilizadas para o destaque da vegetação e da caulinita. Nota-se que na PC2, a razão de bandas ASTER 4/6 tem o maior valor (em módulo).

	CP1	CP2
As3/As2	0,834330	0,551266
As4/As6	-0,551266	0,834330

Tabela 2: PCs entre as razões de bandas utilizadas para o destaque da vegetação e da gibbsita. Nota-se que na PC1, a razão de bandas ASTER 4/7 tem o maior valor (em módulo), o que evidencia um erro associado a essa operação.

	CP1	CP2
As3/As2	-0,446158	-0,894954
As4/As7	-0,894954	0,446158

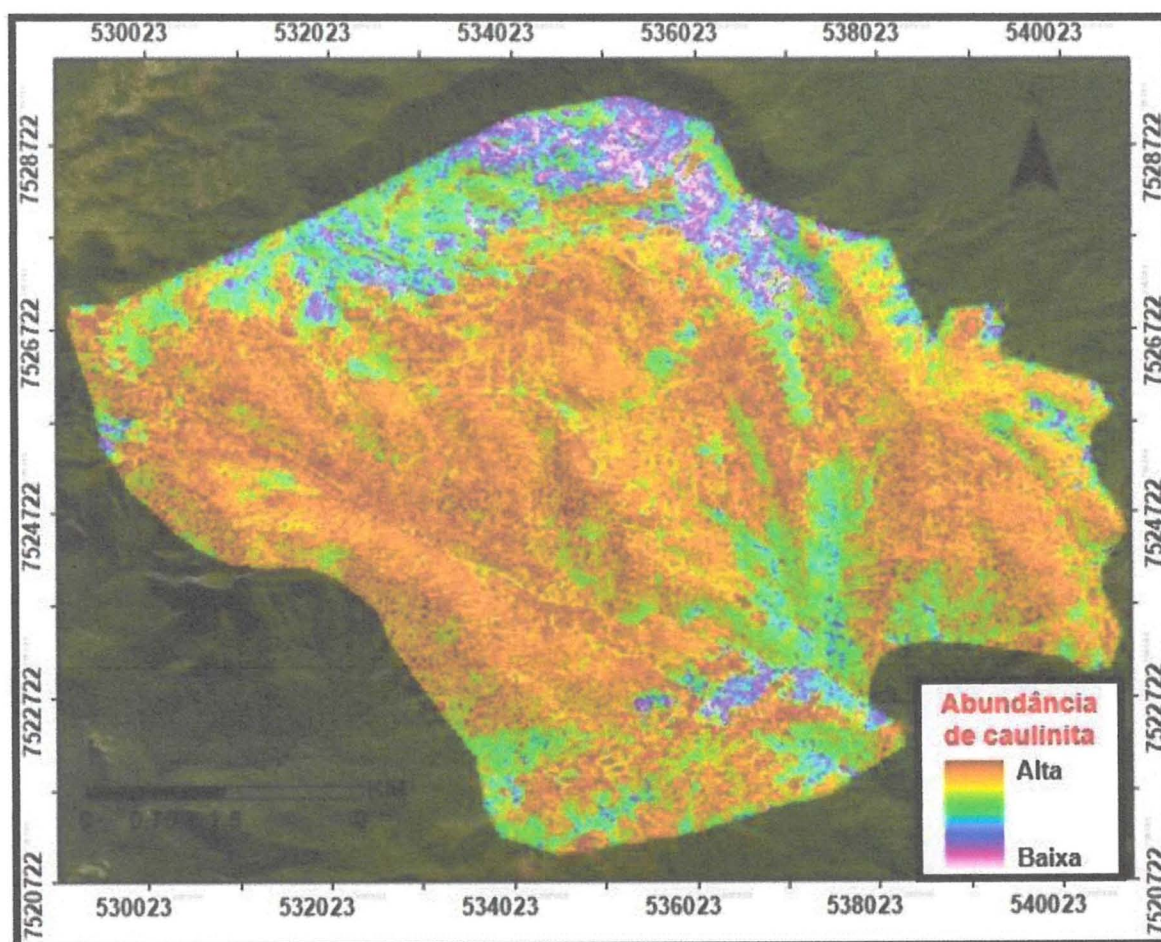


Figura 21: Mapa de abundância de caulinita na área de estudo, produzido através da Técnica Fraser e Green, sobreposto ao MDE SRTM.

7.3. Espectrometria

Com o espectrômetro portátil, 36 medidas, nas superfícies do topo de diversas amostras, foram feitas (Figura 22 e 23). Com o auxílio de artigos como o de Clark et al. (1990) e Clark (1999), buscou-se interpretar as feições de absorção mais representativas das amostras.

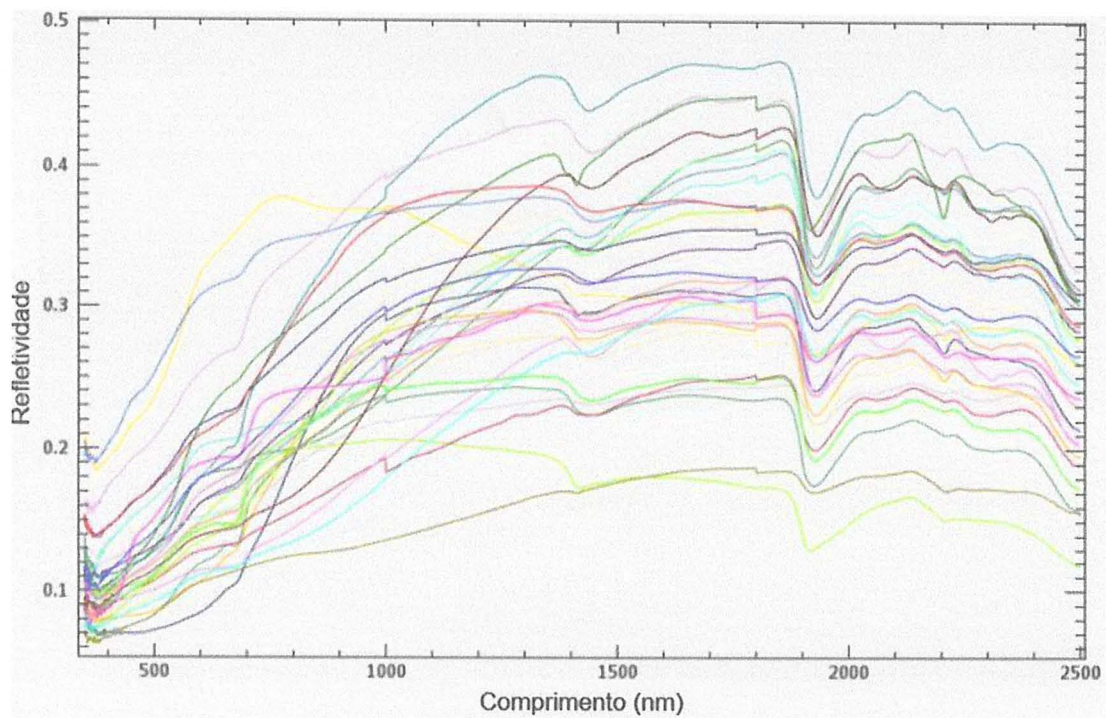


Figura 22: Espectros coletados de todas as amostras na faixa entre 350-2500 nm

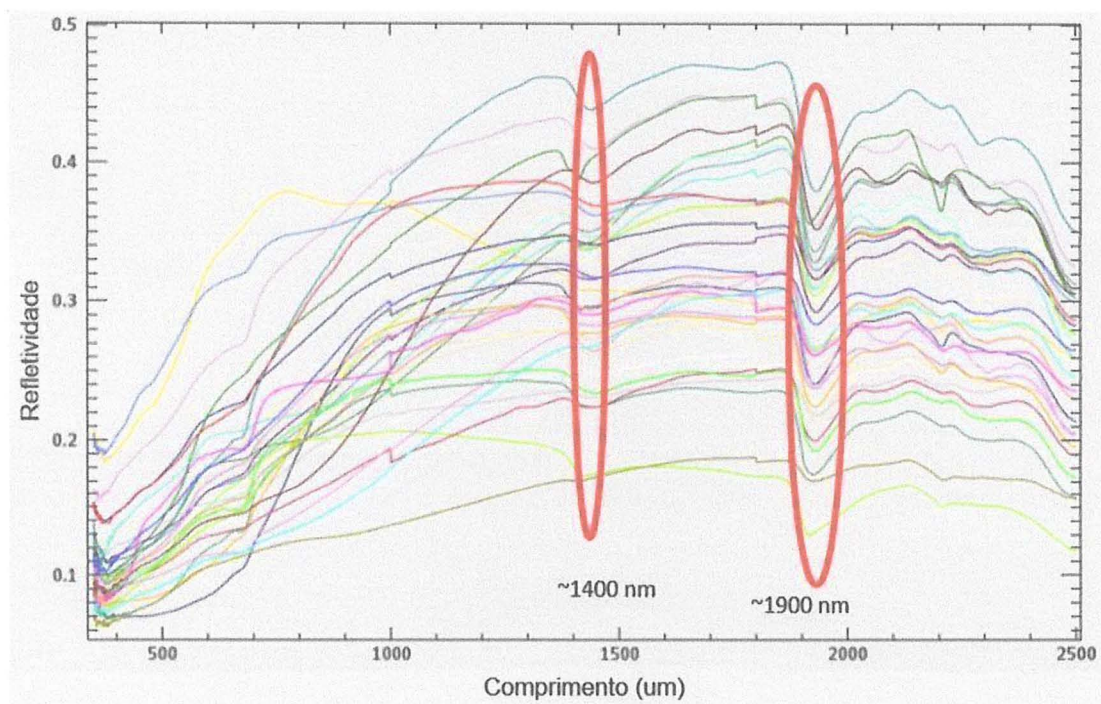


Figura 23: Espectro de todas as amostras medidas com destaque para feições de absorção comuns a todas as curvas de refletividade.

7.4. Petrografia

Fotomicrografias das lâminas delgadas feitas a partir de algumas amostras de campo foram geradas para complementar as informações acerca das alterações intempéricas nas rochas aflorantes da área de estudo (Figura 24 e 25).

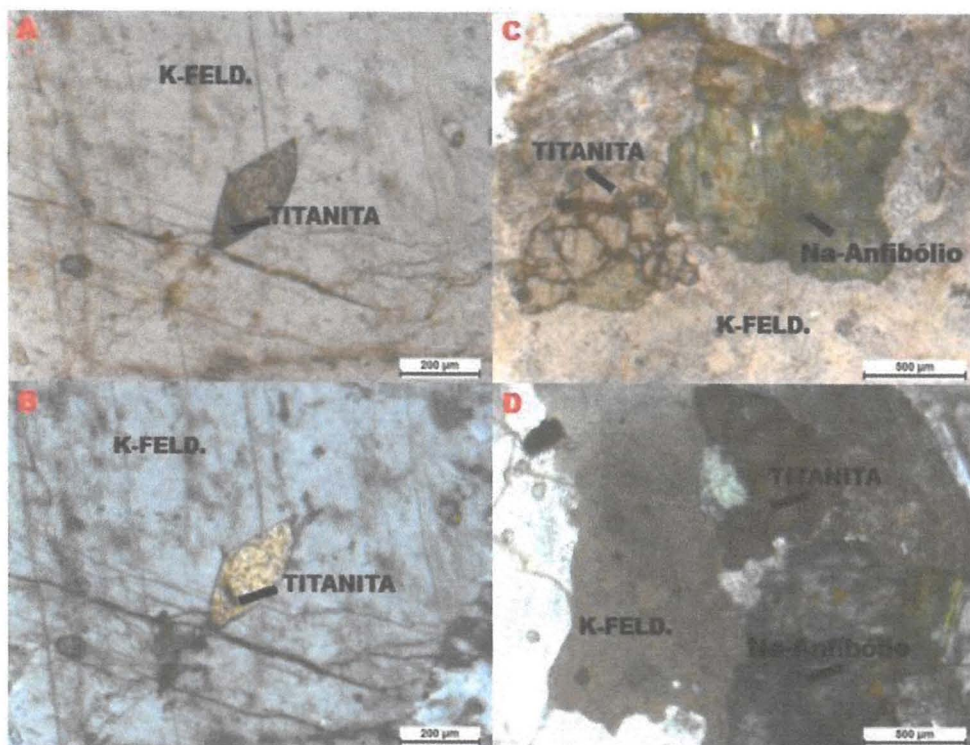


Figura 24: Fotomicrografias representativas das porções alteradas de feldspato alcalino no planalto do PNI. A e B: Cristal de titanita hospedado em cristal de feldspato alcalino com várias porções já transformadas em argilominerais. C e D: Cristais de titanita e anfíbólio sódico envolvidos por cristais de feldspato potássico sericitizado.

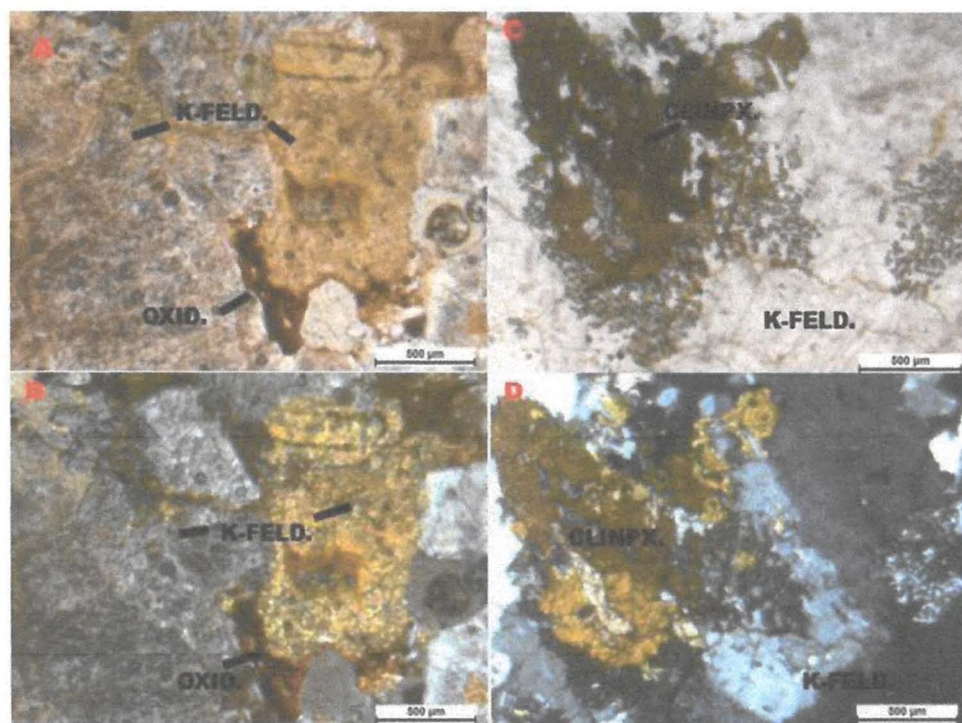


Figura 25: Fotomicrografias representativas das porções alteradas de feldspato alcalino no planalto do PNI. A e B: Cristais de feldspato alcalino transformados em argilominerais, sericitizados e com presença de óxidos. C e D: Cristais de clinopiroxênio com textura poiquilítica, hospedados em cristais de feldspato alcalino argilificado em certas porções.

mineral possuísse o mínimo de ocorrência na superfície das rochas aflorantes do planalto do PNI, esta seria evidenciada pelas técnicas executadas no processamento da imagem.

Posteriormente, com a geração de dados espectrométricos, constatou-se a presença insuficiente da gibbsita para influência espectral na área de estudo.

8.1. MEV e EDS

Como pode ser notado nas Figuras 11 e 14, os mapas de abundância dos principais elementos químicos não forneceram informações relevantes quanto a diferenciação dos minerais alterados para os não intemperizados.

Em processos supérgenos, é comum a lixiviação de íons como os de K, Na e Fe^{2+} . Com exceção do elemento Fe –que está aglomerado em porções tanto mais alteradas quanto não alteradas–, não parece ter havido qualquer empobrecimento destes elementos na porção mais fresca da amostra.

Salienta-se, porém, que o ângulo em que as amostras 05 e 33 foram mapeadas não foi o mais apropriado para a realização do estudo, visto que não estava totalmente oblíquo ao medidor. Isto pode ter levado o aparelho EDS a um erro na quantificação dos elementos na superfície desejada.

8.2. Espectros Amostrados

Conforme consta na Figura 22, importantes feições de absorção ocorrem em todas as medidas de superfície das amostras, a partir de 1400 nm. As duas primeiras ocorrem, respectivamente, em 1400 nm e 1900nm. Clark *et al.* (1990) exhibe diversos exemplos de espectros de reflectância de minerais em que as feições de absorção, nestes comprimentos, ocorrem (Fig. 26)

A água pode ser absorvida fisicamente nas superfícies dos grãos minerais, ou pode ocupar sítios vazios específicos (por exemplo, o berilo), ou pode ser uma parte integral da estrutura cristalina (por exemplo, gipsita). Os vales de reflectância gerados pela água podem ser pronunciados ou mais brandos, dependendo da forma como sítios cristalinos estão sendo ocupados por ela. A presença de vales em 1900 nm indica influência de moléculas de água, enquanto a presença de vales em 1400 nm indica a presença de hidroxila (Clark *et al.*, 1990).

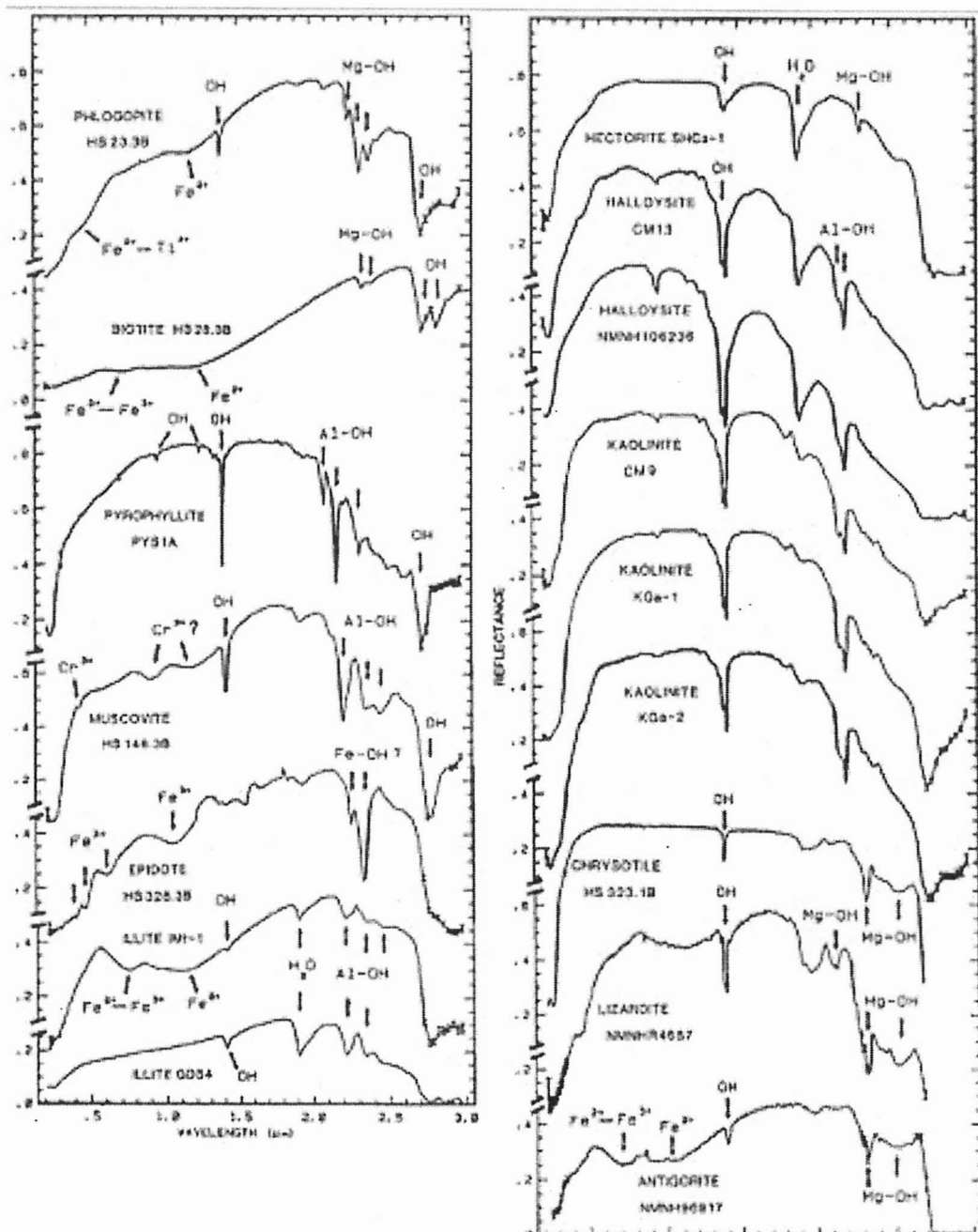


Figura 26: Espectros com alguns minerais que apresentam vales de reflectância na região de 1400 nm ou 1900 nm. Coluna da esquerda (de cima para baixo): flogopita, biotita, pirofilita, muscovita, epídoto e ilita. Coluna da direita (de cima para baixo): hectorita, haloisita, caulinita, crisotila, lizardita e antigorita. Fonte: Clark *et al.* (1990).

Outra feição de absorção ocorre na faixa dos 2200 nm (Figura 27). Em Clark *et al.* (1990), salienta-se que, para a literatura, vales de reflectância nesta região indicam ligações Al-OH.

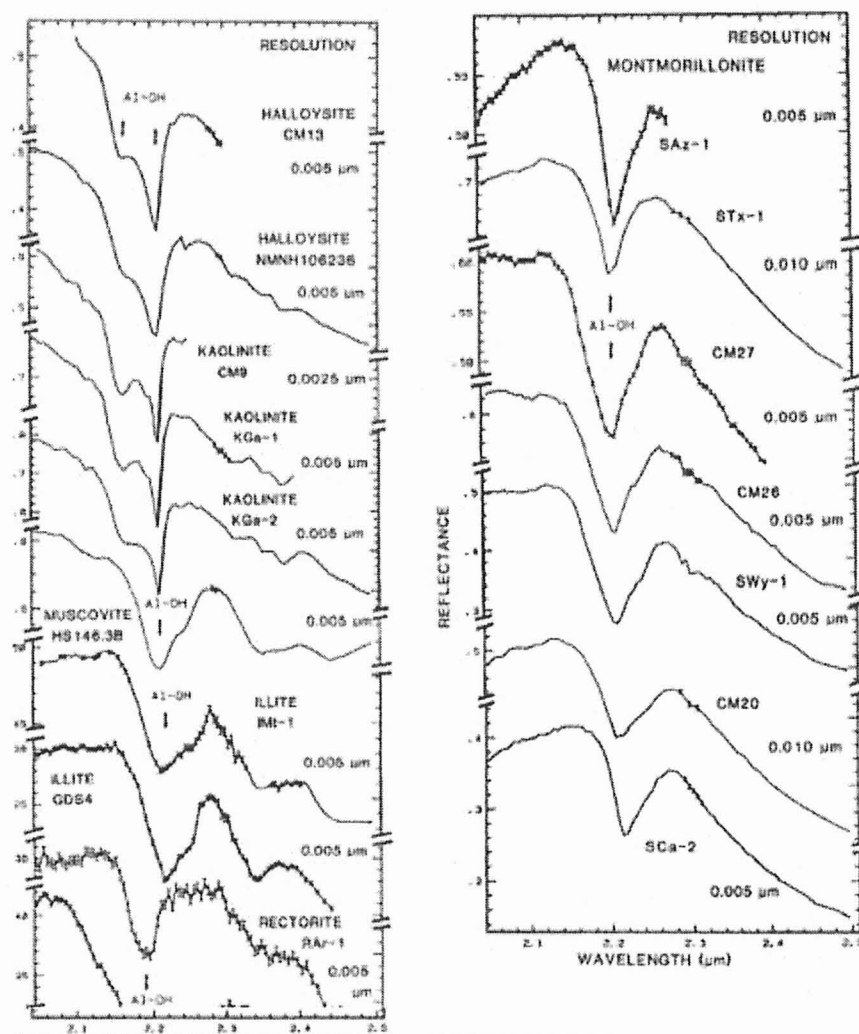


Figura 27: Espectro de alguns minerais com feições de absorção próximos a 2200 nm. Coluna da esquerda (de cima para baixo): haloisita, caulinita, muscovita, ilita e rectorita. Coluna da direita (de cima para baixo): montmorilonita. Fonte: Clark *et al.* (1990).

Diferente das feições espectrais em 1400 e 1900 nm, nem todas as amostras apresentaram vales pronunciados na região dos 2200 (Figura 28), ou até mesmo exibiram, porém com uma feição de absorção no 2300 nm tão relevante quanto. Mesmo assim, a maioria dos espectros coletados apresentaram esta feição, o que leva a necessidade de tentar interpretá-la. Adicionalmente, o mapeamento químico feito no LMEV aponta uma alta quantidade do elemento Al nas amostras, fundamentando a possibilidade desta feição de absorção ser gerada por ligações Al-OH.

Comparou-se uma série de minerais hidratados associados à alteração supergênica (Fig. 26) com o espectro da Amostra 22 -escolhida para representar a curva espectral mais comum dentre os espectros medidos. Apesar de similaridade entre todos, interpreta-se, para este caso, que a curva espectral do mineral ilita ($K_{0.6-0.85}(Al,Mg)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$) é a mais parecida com o espectro da Amostra 22.

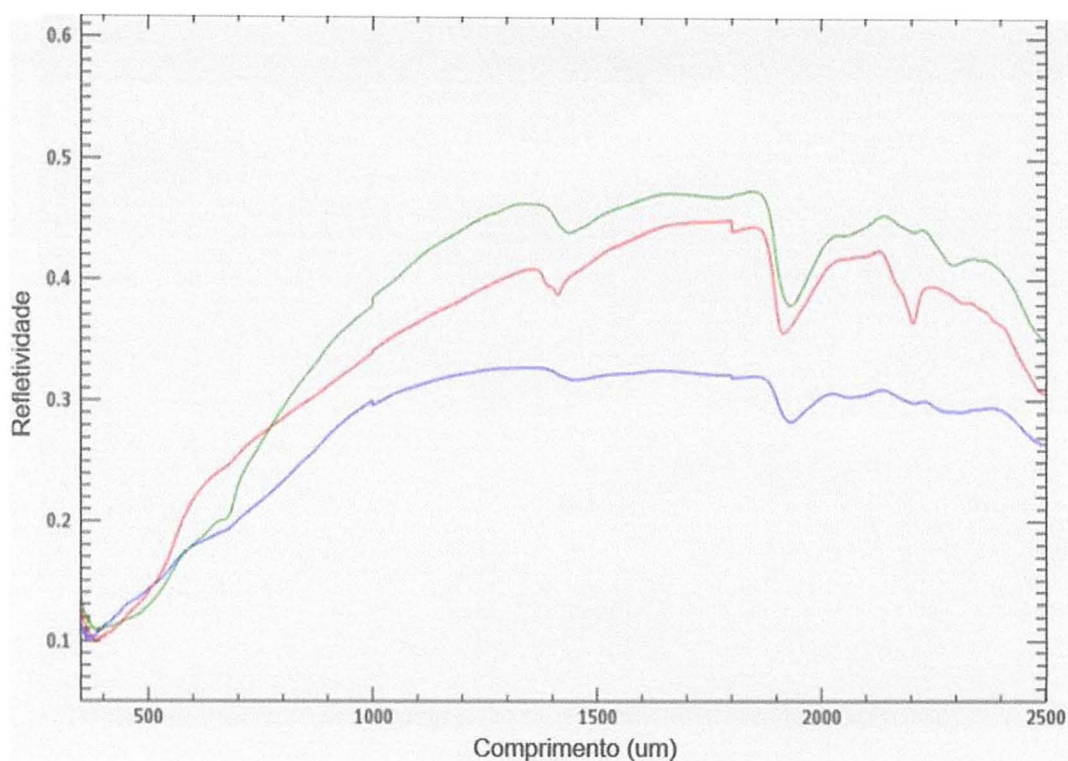


Figura 28: Espectro superficial da amostra 33 (em verde), com vale em 2300 nm mais anunciado do que em 2200 nm; Espectro superficial da amostra 22 (em vermelho), com vale em 2200 nm mais anunciado do que em 2300 nm; Espectro superficial da amostra 16 (em azul), sem feições de absorção relevantes entre 2200-2300 nm.

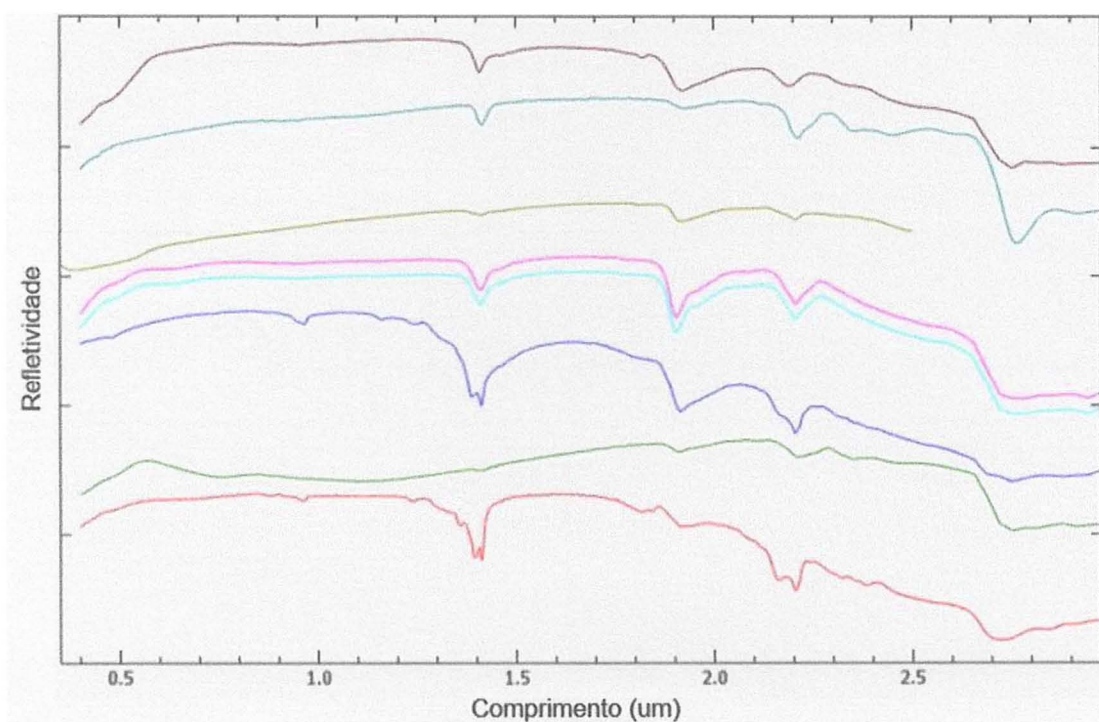


Figura 29: Série de espectros fornecidos pela biblioteca espectral do próprio *software* Envi, comparados com o espectro da amostra 22 (bege), que apresenta feição de absorção em 2200 nm. Minerais: rectorita (vinho), muscovita (azul esverdeado), montmorilonita (rosa e azul claro), haloisita (azul escuro), illita (verde) e caulinita (vermelho).

8.3. Processamento de Imagens Após a Espectrometria

Utilizando a biblioteca espectral de Kokaly *et al.* (2017) para os minerais hidratados comparados com a Amostra 22 (Fig. 30) percebe-se que grande parte dos argilominerais possuem uma feição de absorção característica na banda ASTER 6. Consequentemente, o mapa de abundância mineral feito para a caulinita acaba por, na realidade, ser um mapa de abundância da maioria dos possíveis argilominerais da área de estudo.

Ainda utilizando as curvas de reflectância de Kokaly *et al.* (2017) para o mineral illita – interpretado como o principal mineral secundário das amostras coletadas-, constata-se que este pode conter, em seu espectro reamostrado para a resolução espectral ASTER, um pico de reflectância na banda 5, diferenciando-o de grande parte dos espectros, também reamostrados, de outros argilominerais (Fig. 31)

Na tentativa de destacar a illita, aplicou-se a mesma sequência de processamento de imagem feita para ressaltar a caulinita (Figuras 32 e 33; Tabela 3).

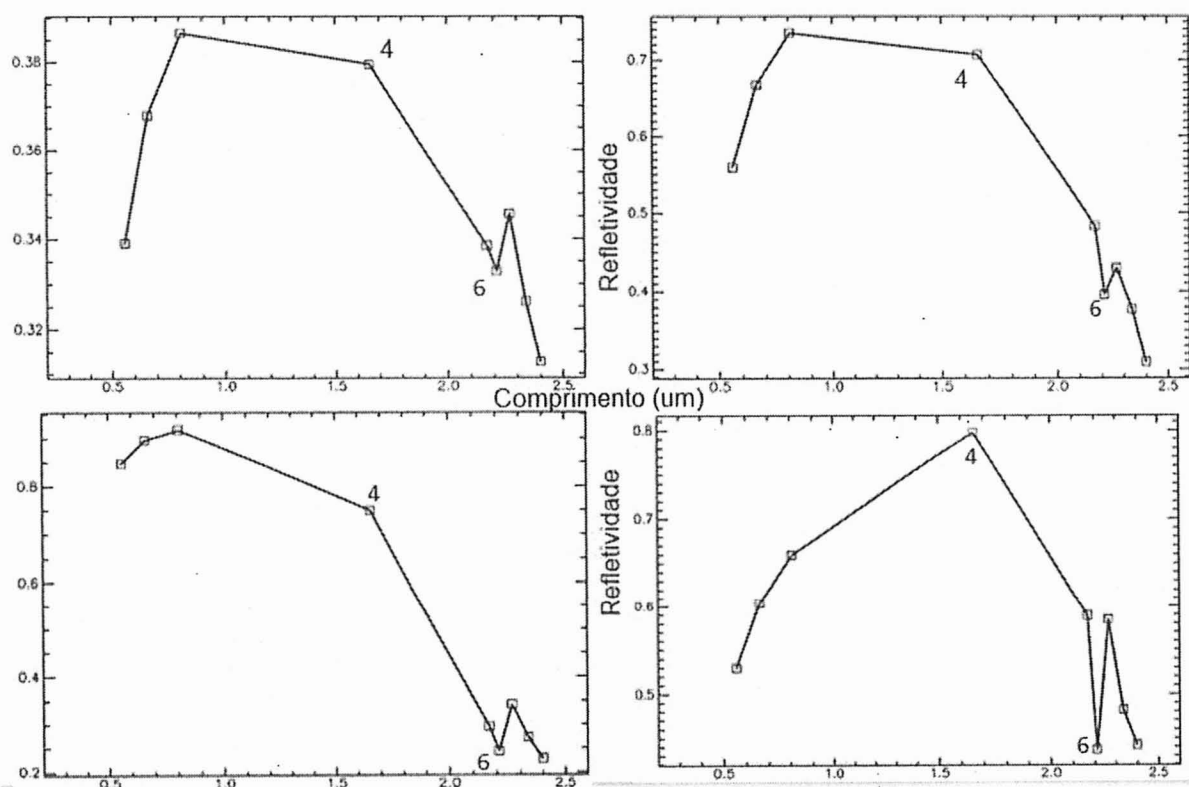


Figura 30: Espectros reamostrados para resolução espectral ASTER. Superior esquerdo: rectorita; Superior direito: montmorilonita; Inferior esquerdo: halosita; Inferior direito: muscovita. Fonte: Kokaly *et al.* (2017).

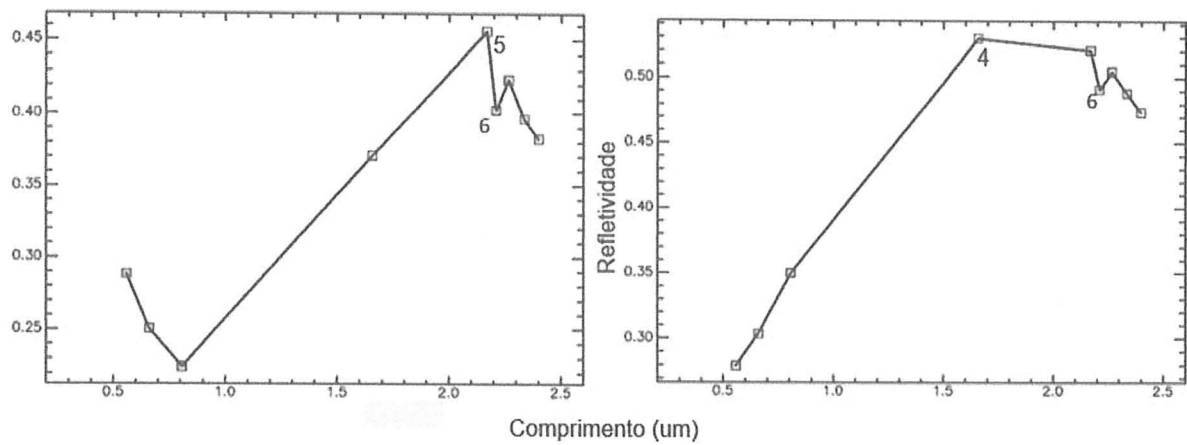


Figura 31: Espectros reamostrados para resolução espectral ASTER de ilita, com picos de reflectância na banda 5 (Fig.31a) e na banda 4 (Fig.31b). Fonte: Kokaly *et al.* (2017).

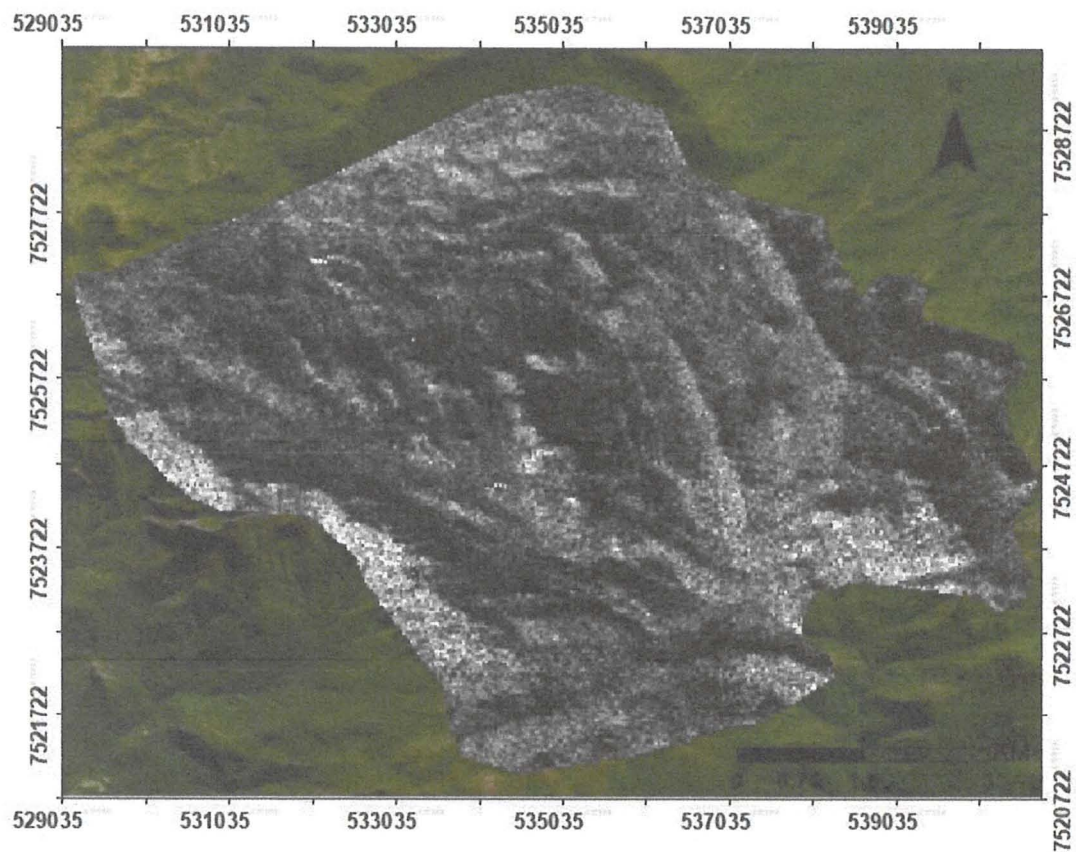


Figura 32: Realce de ilita na área de estudo, produzido pela razão de bandas ASTER

Tabela 3: PCs entre as razões de bandas utilizadas para o destaque da vegetação e da ilita. Nota-se que na CP2, a razão de bandas ASTER 5/6 tem o maior valor (em módulo).

	CP1	CP2
As3/As2	0.93244707	0.36130661
As5/As6	-0.36130661	0.93244707

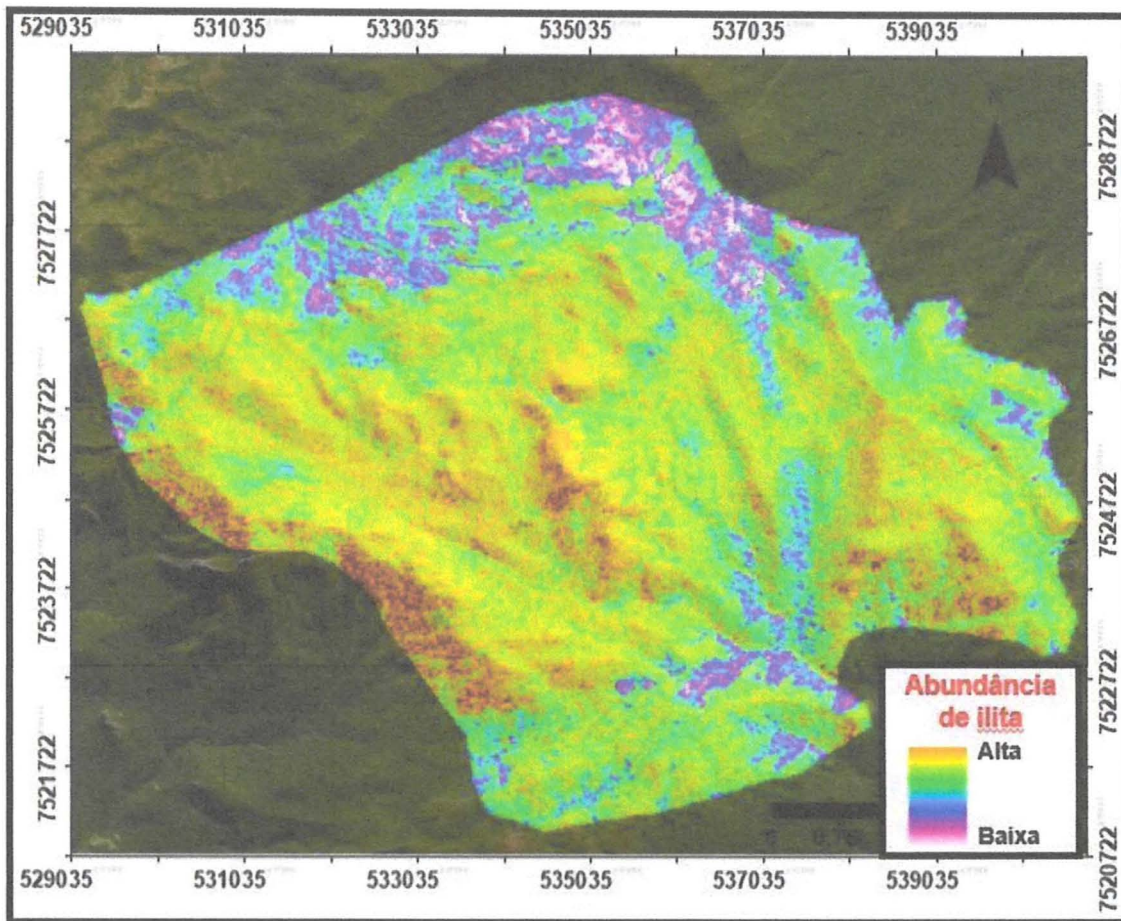


Figura 33: Mapa de abundância de ilita na área de estudo, produzido através da Técnica Fraser e Green, sobreposto ao MDE SRTM. Deve-se ressaltar que as porções em laranja escuro e marrom são dados espúrios, uma vez que estão exatamente localizadas nas regiões de sombra (Número Digital próximo ou igual a zero).

Por fim, fez-se uma composição colorida com a ilita, os demais argilominerais, e a vegetação (Figura 34). Como pode ser observado neste mapa, há o predomínio das cores roxa/rosa –evidenciando uma igual distribuição entre ilita e os demais argilominerais, e a cor verde, realçando a vegetação

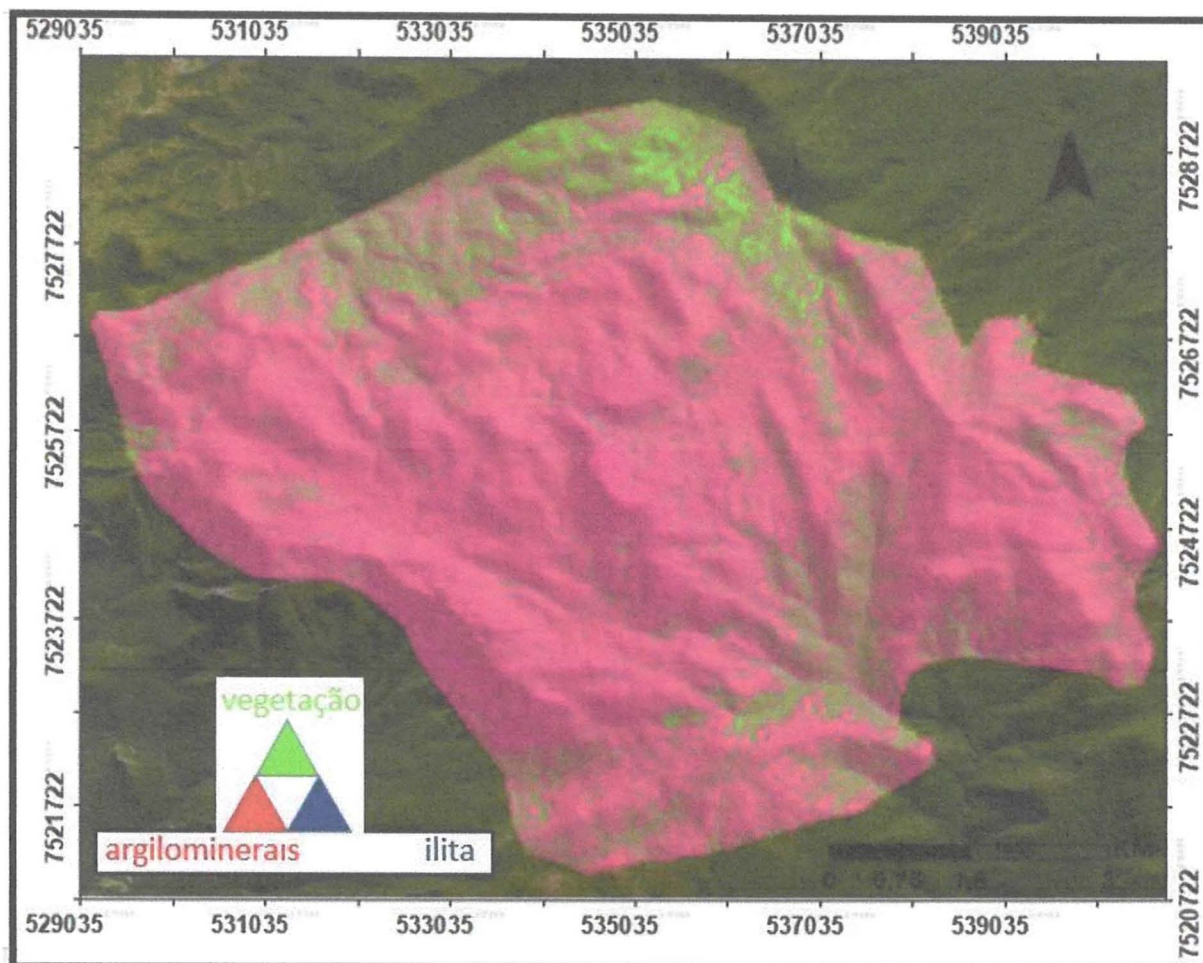


Figura 34: Composição colorida entre ilita, minerais de alteração supergênica e vegetação, sobreposta ao MDE SRTM. Deve-se ressaltar que as porções em roxo escuro são dados espúrios, uma vez que estão exatamente localizadas nas regiões de sombra (Número Digital próximo ou igual a zero).

9. CONCLUSÕES

O trabalho realizado conseguiu mapear, por sensoriamento remoto, os minerais que mais influenciavam espectralmente a imagem digital ASTER, adquirida para o projeto, na Parte Alta do Parque do Itatiaia.

Os espectros medidos com o aparelho Fieldspec 3™ foram essenciais, tanto para reconhecer a mineralogia das superfícies dos afloramentos, quanto para guiar e confirmar os resultados obtidos no processamento de imagem.

Como a Figura 34 mostra, apesar de ter-se interpretado a ilita como principal mineral de alteração na área de estudo, a mesma não conseguiu ser distinguida dos demais minerais supérgenos.

Não foi detectado, tanto no processamento de imagem quanto na espectrometria, influência dos espectros da mineralogia original das rochas do CAI, sugerindo que não há rochas com superfície fresca no Planalto do Itatiaia.

Como a Figura 35 evidencia, as mudanças litológicas mapeadas na área não controlam a abundância da ilita ou os demais minerais de alteração.

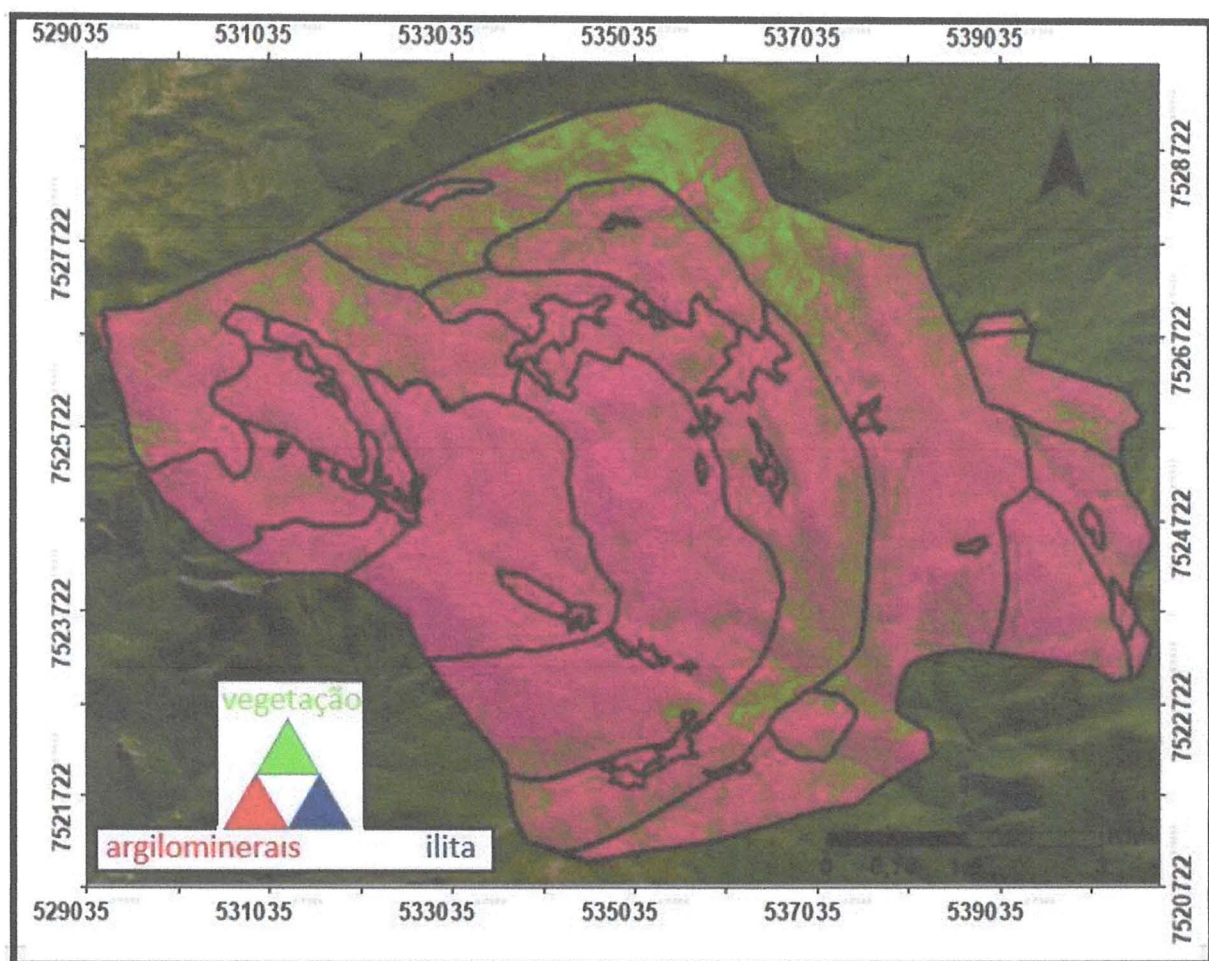


Figura 35: Mapa similar ao da figura 34, porém com os limites litológicos delimitados por Rosa (2017, no prelo).

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, M. (2000). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote sensing*, 21(5), 847-859.
- Amaral, G., Bushee, J., Cordani, U.G., Kawashita, K., Reynolds, J.H. (1967). *Potassium- argon ages of alkaline rocks from southern Brazil*. *Geoch. et Cosmoch Acta*, 31: 117-142
- Bedini, E. (2011). *Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data*. *Advances in Space Research*, 47(1), 60-73.
- Brotzu, P., Gomes, C. B., Melluso, L., Morbidelli, L., Morra, V., Ruberti, E. (1997). *Petrogenesis of coexisting SiO₂-undersaturated to SiO₂-oversaturated felsic igneous rocks: the alkaline complex of Itatiaia, southeastern Brazil*. *Lithos*, 40(2-4), 133-156.
- Clark, R. N. (1999). *Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. Manual of remote sensing*, 3, 3-58.
- Clark, R. N., King, T. V., Klejwa, M., Swayze, G. A., Vergo, N. (1990). *High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95 (B8), 12653-12680.
- Crósta, A. P., De Souza Filho, C. R., Azevedo, F., Brodie, C. (2003). *Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis*. *International journal of Remote sensing*, 24(21), 4233-4240.
- Crósta, A. P., De Souza Filho, C. R. (2003). *Searching for gold with ASTER*. *Earth Observation Magazine*, 12(5), 38-41.
- Derby, O. A. (1887). On nepheline-rocks in Brazil, with special reference to the association of phonolite and foyaite. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 43(1-4), 457-473.
- Enrich, G. E. R., Azzone, R. G., Ruberti, E., Gomes, C. B., Comin-Chiaramonti, P. (2005). *Itatiaia, Passa Quatro and São Sebastião Island, The major alkaline syenitic complexes from the Serra do Mar region. Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*. Edusp/Fapesp, São Paulo, 419-441.
- Fraser, S. J., Green, A. A. (1987). *A software defoliant for geological analysis of band ratios*. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3), 525-532.
- Gabr, S., Ghulam, A., Kusky, T. (2010). *Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data*. *Ore Geology Reviews*, (38), 59-69
- Galvao, L.S., Almeida-Filho, R., Vitorello, I. (2005). *Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: evaluation in a tropical savannah*

environment. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 7, 107–114

Guha, A., Singh, V. K., Parveen, R., Kumar, K. V., Jeyaseelan, A. T., Rao, E. D. (2013). *Analysis of ASTER data for mapping bauxite rich pockets within high altitude lateritic bauxite, Jharkhand, India*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 21, 184-194.

Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A. C., Campos Neto, M. D. C., Silva, L. D., Trouw, R. A. J., Janasi, V. D. A. (2004). *Província Mantiqueira. Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 203-235.

Heilbron, M., Ribeiro, A., Valeriano, C. M., Paciullo, F. V., Almeida, J. C. H., Trouw, R. J. A., Silva, L. E. (2017). *The Ribeira Belt. In São Francisco Craton, Eastern Brazil*. Springer International Publishing. 277-302.

Kokaly, R. F., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., Klein, A. J. (2017). *USGS Spectral Library Version 7*. US Geological Survey n1035.

Kotschoubey, B. (1988). *Geologia do alumínio. Principais Depósitos Minerais do Brasil*. DNPM, Brasília, 3, 599-619.

Meneses, P. R., Almeida, T. D. (2012). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Embrapa Cerrados- Livros técnicos (INFOTECA-E).

Montes-Lauar, C. R., Pacca, I. G., Melfi, A. J., Kawashita, K. (1995). *Late Cretaceous alkaline complexes, southeastern Brazil: paleomagnetism and geochronology*. Earth and Planetary Science Letters, 134(3-4), 425-440.

Penalva, F. (1967). *Geologia e tectônica da região do Itatiaia (sudeste do Brasil)*. Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia, (22), 99- 193.

Ribeiro Filho, E. (1967). *Geologia e petrologia dos maciços alcalinos do Itatiaia e Passa-Quatro (Sudeste do Brasil)*. Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia, (22), 9-89.

Ribeiro Filho, E., Cordani, U. G. (1966). *Contemporaneidade das intrusões de rochas alcalinas do Itatiaia, Passa Quatro e Morro Redondo*. 1, 62-63.

Rodrigues, J. E. (1981). *Aplicação de sensoriamento remoto no mapeamento geológico da região do complexo alcalino de Itatiaia*.

Rosa, P. A. da S. (2017). *Geologia e Evolução Petrogenética do Maciço Alcalino de Itatiaia, MG-RJ*. Tese (Doutorado). IGc/USP. No prelo.

Rowan, L. C., Mars, J. C. (2003). *Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. Remote sensing of Environment*, 84(3), 350-366.

Sonoki, I. K., Garda, G. M. (1988). Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil Meridional e Paraguai Oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. *Boletim IG-USP. Série Científica*, 19, 63-85.

Thompson, R. N., Gibson, S. A., Mitchell, J. G., Dickin, A. P., Leonardos, O. H., Brod, J. A., Greenwood, J. C. (1998). *Migrating Cretaceous–Eocene Magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the Deflected Trindade Mantle Plume. Journal of Petrology*, 39(8), 1493-1526.

Project: André Pires Negrão

Owner: INCA

Sample: João Mariante Santana 33

Type: Default

Label : Sum Spectrum 33003

Collected : 23-Oct-2017 03:35 PM

Livetime (s) : 987.96

Real time (s) : 0.00

Detector : Silicon

Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0

Elevation (deg) : 35.0

Azimuth (deg) : 0.0

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is coated with Carbon - thickness (nm): 15.0, density (g/cm3): 2.25

Thresholding has been selected : All quantitative results below 1 sigma have been set to zero

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of ions calculation based on 8.00 anions per formula

Number of iterations = 3

Standard :

Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Number
	Conc.	Corrn.		Sigma				of ions
Na K	7.02	0.8490	4.19	0.04	3.81	5.64	Na2O	0.49
Mg K	0.24	0.7408	0.16	0.02	0.14	0.27	MgO	0.02
Al K	14.31	0.8544	8.48	0.04	6.57	16.03	Al2O3	0.84
Si K	52.49	0.8330	31.91	0.06	23.74	68.27	SiO2	3.05
S K	0.22	0.7254	0.15	0.02	0.10	0.38	SO3	0.01
Cl K	0.11	0.6833	0.08	0.02	0.05	0.00		0.01
K K	6.96	0.9718	3.63	0.03	1.94	4.37	K2O	0.25
Ti K	0.55	0.8069	0.34	0.02	0.15	0.57	TiO2	0.02
Mn K	0.41	0.8103	0.26	0.03	0.10	0.33	MnO	0.01
Fe K	5.14	0.8281	3.15	0.04	1.18	4.05	FeO	0.15
O			47.64	0.07	62.23			7.99
Totals			100.00					
							Cation sum	4.85

Project: André Pires Negrão

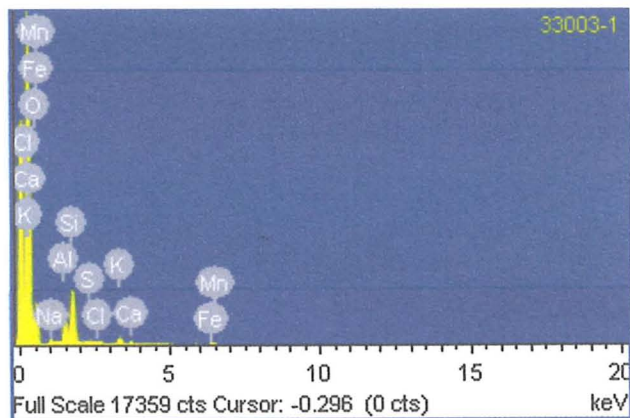
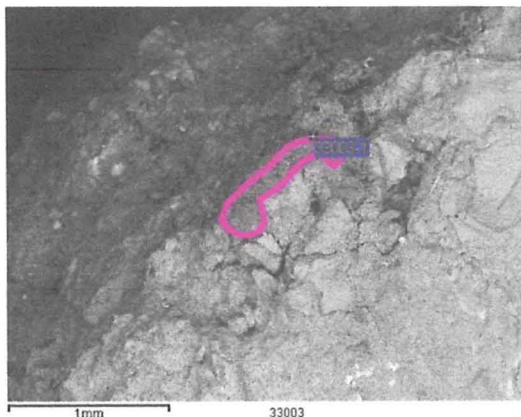
Owner: INCA

Site: 33003

Sample: João Mariante Santana 33

Type: Default

ID:



Label : 33003-1

Collected : 23-Oct-2017 03:36 PM

Livetime (s) : 100.00

Real time (s) : 108.93

Detector : Silicon

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is coated with Carbon - thickness (nm): 15.0, density (g/cm3): 2.25

Thresholding has been selected : All quantitative results below 1 sigma have been set to zero

Detector efficiency : Calculation

Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 13.770 keV

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of iterations = 3

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Number
	Conc.	Corrn.		Sigma				of ions
Na K	1.52	0.8203	3.62	0.33	3.35	4.88	Na2O	0.43
Al K	4.46	0.8458	10.29	0.30	8.12	19.45	Al2O3	1.05
Si K	11.12	0.8110	26.74	0.44	20.28	57.21	SiO2	2.61
S K	0.70	0.7478	1.82	0.25	1.21	4.53	SO3	0.16
Cl K	0.17	0.6914	0.49	0.24	0.29	0.00		0.04
K K	2.20	0.9794	4.38	0.26	2.38	5.27	K2O	0.31
Ca K	0.57	0.9318	1.20	0.23	0.64	1.68	CaO	0.08
Mn K	0.30	0.8125	0.71	0.30	0.28	0.92	MnO	0.04
Fe K	1.85	0.8308	4.33	0.38	1.65	5.58	FeO	0.21
O			46.42	0.59	61.80			7.96
Totals			100.00					
							Cation sum	4.88

Project: André Pires Negrão

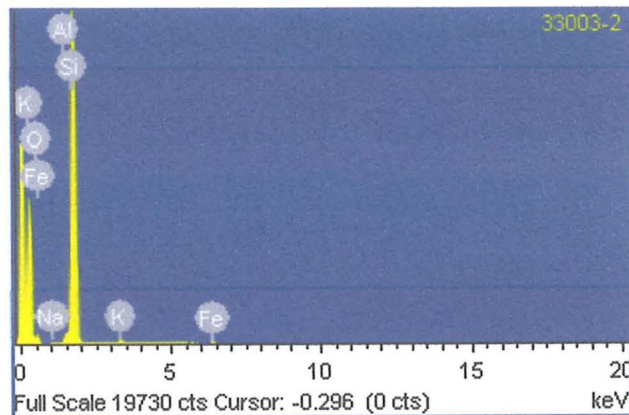
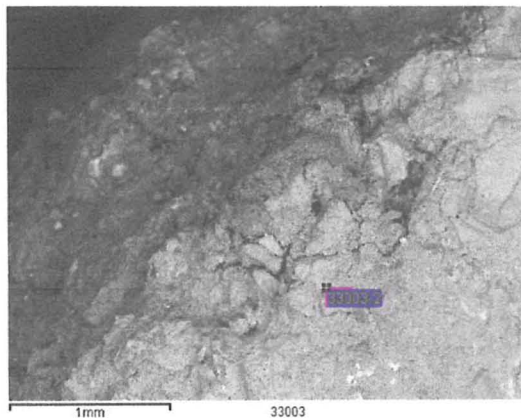
Owner: INCA

Site: 33003

Sample: João Mariante Santana 33

Type: Default

ID:



Label : 33003-2

Collected : 23-Oct-2017 03:38 PM

Livetime (s) : 100.00

Real time (s) : 111.56

Detector : Silicon

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is coated with Carbon - thickness (nm): 15.0, density (g/cm³): 2.25

Thresholding has been selected : All quantitative results below 1 sigma have been set to zero

Detector efficiency : Calculation

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Number
	Conc.	Corrn.		Sigma				of ions
Na K	0.59	0.8651	0.36	0.07	0.31	0.48	Na2O	0.04
Al K	1.84	0.9166	1.06	0.06	0.79	2.01	Al2O3	0.10
Si K	81.46	0.9604	44.93	0.18	32.24	96.12	SiO2	3.90
K K	1.00	0.9471	0.56	0.07	0.29	0.68	K2O	0.03
Fe K	0.86	0.8192	0.56	0.11	0.20	0.72	FeO	0.02
O			52.53	0.19	66.17			8.00
Totals			100.00					
							Cation sum	4.09

Project: André Pires Negrão

Owner: INCA

Sample: João Mariante Santana 5

Type: Default

Label : Sum Spectrum 5003

Collected : 23-Oct-2017 04:16 PM

Livetime (s) : 983.04

Real time (s) : 0.00

Detector : Silicon

Window : SATW

Tilt (deg) : 0.0

Elevation (deg) : 35.0

Azimuth (deg) : 0.0

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is coated with Carbon - thickness (nm): 15.0, density (g/cm³): 2.25

Thresholding has been selected : All quantitative results below 1 sigma have been set to zero

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of ions calculation based on 8.00 anions per formula

Number of iterations = 3

Standard :

Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AMSi SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM

S FeS2 1-Jun-1999 12:00 AM

Cl KCl 1-Jun-1999 12:00 AM

K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM

Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

[illegible]

Project: André Pires Negrão

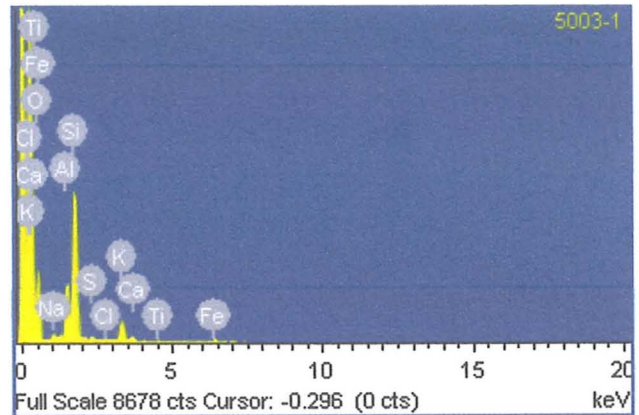
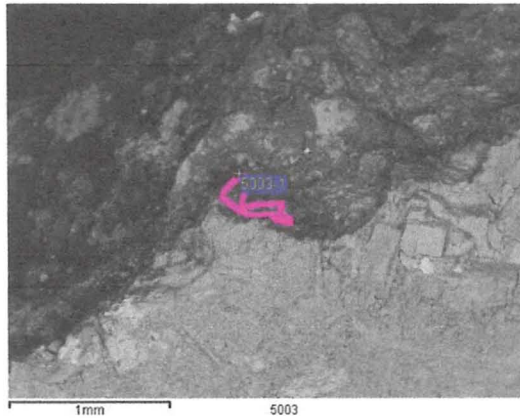
Owner: INCA

Site: 5003

Sample: João Mariante Santana 5

Type: Default

ID:



Label : 5003-1

Collected : 23-Oct-2017 04:17 PM

Livetime (s) : 100.00

Real time (s) : 107.61

Detector : Silicon

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is coated with Carbon - thickness (nm): 15.0, density (g/cm³): 2.25

Thresholding has been selected : All quantitative results below 1 sigma have been set to zero

Detector efficiency : Calculation

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of iterations = 3

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Number
	Conc.	Corrn.		Sigma				of ions
Na K	1.18	0.8368	2.19	0.22	2.01	2.95	Na2O	0.26
Al K	5.54	0.8728	9.84	0.23	7.71	18.59	Al2O3	0.98
Si K	15.93	0.8322	29.66	0.36	22.33	63.45	SiO2	2.85
S K	0.39	0.7395	0.82	0.16	0.54	2.04	SO3	0.07
Cl K	0.20	0.6905	0.46	0.15	0.27	0.00		0.03
K K	3.40	0.9769	5.40	0.20	2.92	6.50	K2O	0.37
Ca K	0.49	0.9248	0.83	0.15	0.44	1.16	CaO	0.06
Ti K	0.29	0.8020	0.57	0.17	0.25	0.95	TiO2	0.03
Fe K	1.62	0.8273	3.03	0.27	1.15	3.90	FeO	0.15
O			47.21	0.44	62.39			7.97
Totals			100.00					
							Cation sum	4.77

Project: André Pires Negrão

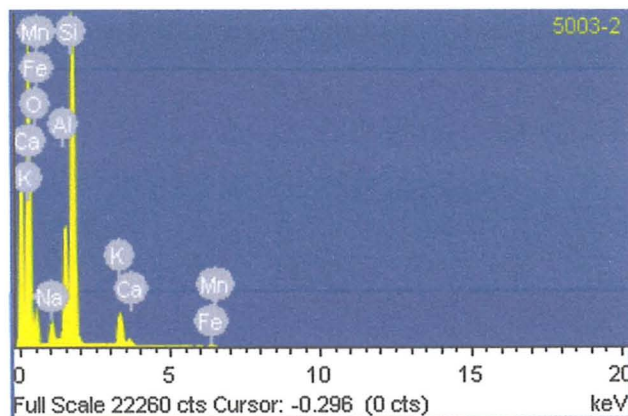
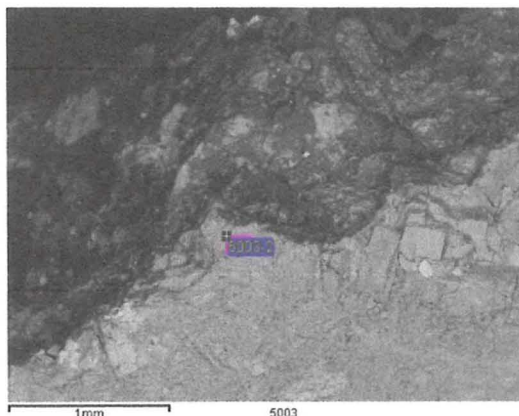
Owner: INCA

Site: 5003

Sample: João Mariante Santana 5

Type: Default

ID:



Label : 5003-2

Collected : 23-Oct-2017 04:19 PM

Livetime (s) : 100.00

Real time (s) : 117.21

Detector : Silicon

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is coated with Carbon - thickness (nm): 15.0, density (g/cm³): 2.25

Thresholding has been selected : All quantitative results below 1 sigma have been set to zero

Detector efficiency : Calculation

Spectrum processing :

Peak possibly omitted : 8.760 keV

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of iterations = 3

Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Number
	Conc.	Corrn.		Sigma				of ions
Na K	9.34	0.8825	3.17	0.08	2.85	4.27	Na2O	0.36
Al K	29.49	0.8880	9.95	0.09	7.62	18.79	Al2O3	0.97
Si K	91.11	0.8382	32.55	0.15	23.97	69.64	SiO2	3.07
K K	15.33	0.9686	4.74	0.08	2.51	5.71	K2O	0.32
Ca K	1.27	0.9202	0.41	0.05	0.21	0.58	CaO	0.03
Mn K	0.25	0.8060	0.09	0.06	0.04	0.12	MnO	0.00
Fe K	1.88	0.8239	0.68	0.07	0.25	0.88	FeO	0.03
O			48.40	0.16	62.55			8.00
Totals			100.00					
							Cation sum	4.79

Project: André Pires Negrão

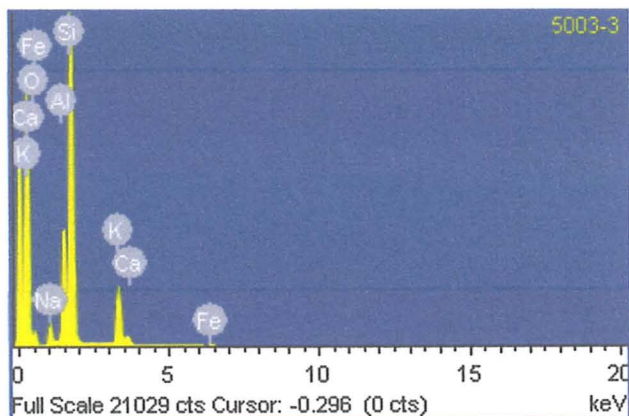
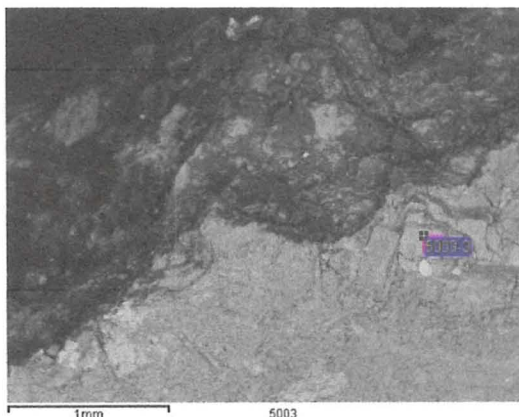
Owner: INCA

Site: 5003

Sample: João Mariante Santana 5

Type: Default

ID:



Label : 5003-3

Collected : 23-Oct-2017 04:21 PM

Livetime (s) : 100.00

Real time (s) : 116.38

Detector : Silicon

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is coated with Carbon - thickness (nm): 15.0, density (g/cm3): 2.25

Thresholding has been selected : All quantitative results below 1 sigma have been set to zero

Detector efficiency : Calculation

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of iterations = 3

Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM

Al Al2O3 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Number
	Conc.	Corrn.		Sigma				of ions
Na K	7.49	0.8805	2.65	0.08	2.41	3.57	Na2O	0.31
Al K	27.36	0.8942	9.53	0.09	7.39	18.01	Al2O3	0.95
Si K	86.47	0.8479	31.77	0.14	23.66	67.97	SiO2	3.05
K K	25.22	0.9749	8.06	0.09	4.31	9.71	K2O	0.56
Ca K	0.69	0.9099	0.24	0.05	0.12	0.33	CaO	0.02
Fe K	0.84	0.8233	0.32	0.07	0.12	0.41	FeO	0.02
O			47.43	0.16	61.99			8.00
Totals			100.00					
							Cation sum	4.90

Project: André Pires Negrão

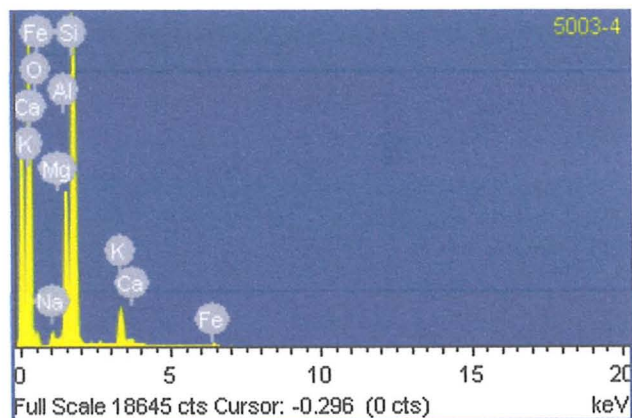
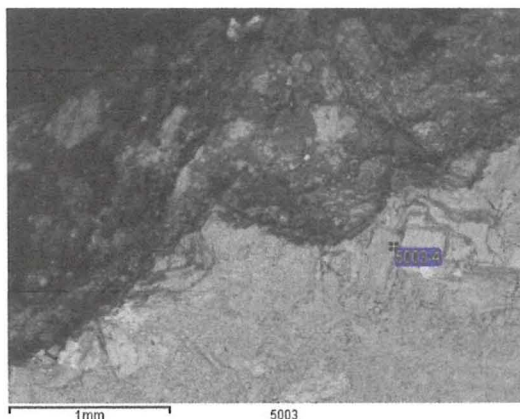
Owner: INCA

Site: 5003

Sample: João Mariante Santana 5

Type: Default

ID:



Label : 5003-4

Collected : 23-Oct-2017 04:23 PM

Livetime (s) : 100.00

Real time (s) : 115.73

Detector : Silicon

Sample is unpolished X-ray corrections may be approximate.

Sample is coated with Carbon - thickness (nm): 15.0, density (g/cm3): 2.25

Thresholding has been selected : All quantitative results below 1 sigma have been set to zero

Detector efficiency : Calculation

Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)

Number of iterations = 3

Standard :

Mg MgO 1-Jun-1999 12:00 AM

Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM

K MAD-10 Feldspar 1-Jun-1999 12:00 AM

Ca Wollastonite 1-Jun-1999 12:00 AM

Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula	Number
	Conc.	Corrn.		Sigma				of ions
Na K	3.88	0.8755	1.46	0.07	1.32	1.97	Na2O	0.17
Mg K	0.81	0.7964	0.34	0.05	0.29	0.56	MgO	0.04
Al K	33.34	0.8990	12.26	0.10	9.42	23.16	Al2O3	1.20
Si K	76.86	0.8207	30.96	0.15	22.87	66.24	SiO2	2.91
K K	14.80	0.9702	5.04	0.08	2.67	6.07	K2O	0.34
Ca K	1.50	0.9201	0.54	0.05	0.28	0.75	CaO	0.04
Fe K	2.40	0.8243	0.96	0.08	0.36	1.24	FeO	0.05
O			48.43	0.17	62.79			8.00
Totals			100.00					
							Cation sum	4.74