

## **Mapeamento de pegmatitos da Faixa Seridó (FSe) com base na análise por componentes principais de imagens TM/Landsat-5 e Terra/ASTER e o apoio da espectroscopia de reflectância.**

Sebastião Milton Pinheiro da Silva<sup>1</sup>  
Alvaro Penteado Crósta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Campus Universitário, Lagoa Nova, Caixa Postal 1528, CEP: 59072-960. Natal/RN.  
Telefone: (84) 32153571, ramal 2502. [smpsilva@cchla.ufrn.br](mailto:smpsilva@cchla.ufrn.br).

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Campinas  
Campus Universitário Zeferino Vaz. Rua João Pandiá Calógeras, 51. CEP: 13083-870.  
Barão Geraldo, Campinas/SP. Telefone: (19) 3521-5120, Fax: (19) 3289-1562.

**Abstract:** Mineralogical mapping of pegmatites of Serido Belt in northeastern Brazil was achieved using TM/Landsat-5 and Terra/ASTER images, principal component analysis and reflectance spectroscopy (RE) measurements. Minerals such as kaolinite, muscovite, illite/sericite, lepidolite, cookeite, Na-micas and tourmaline were characterized by RE in pegmatites of the studied area. Based on principal component analysis (PCA) of selected sub-sets of Landsat and ASTER bands, and using the Crósta mineral mapping technique, a map of the relative abundance of minerals was produced for the study area with ASTER bands. With Landsat it was possible to individualize some of the pegmatites based on spectral signatures of iron and hydroxyl bearing minerals. These results demonstrate the potential of using ER and multispectral remote sensing in the study of pegmatites in the FSe. Due to its higher spectral resolution, Terra/ASTER image has more capability than Landsat image for enhancing areas with the minerals on interest.

**Keywords:** reflectance spectroscopy, pegmatites, remote sensing, Crósta technique, Seridó Belt, principal component analysis.

### **1. Introdução**

O semi-árido nordestino possui destacado potencial para o desenvolvimento de aplicações do sensoriamento remoto geológico no intervalo do espectro ótico refletido e emitido. Ocorre que a disponibilidade de imagens é muita baixa em relação ao centro-sul do país, devido à freqüente cobertura de nuvens na região. Uma alternativa para contornar esse problema é através do uso alternativo de dados de vários sensores adquiridos em épocas distintas do ano ou em anos diferentes. A situação é mais grave com imagens Terra/ASTER e EO-1 Hyperion de melhor resolução espectral, devido à sua relativamente limitada cobertura temporal.

O objeto deste estudo foram os pegmatitos que ocorrem na Faixa Serido (FSe), nos quais são reconhecidos processos de alteração hidrotermal e supergênicos de caulnização, sericitização, lepidotilização, lateritização, entre outros. São processos em que argilominerais diagnósticos são passíveis de identificação com a técnica da espectroscopia de reflectância (ER) e de mapeamento mineralógico com base na assinatura espectral de suas assembléias características registradas por sensores como o Landsat/TM e ETM<sup>+</sup> e o Terra/ASTER. São técnicas de uso crescente na exploração mineral em variados tipos de terrenos geológicos e de zoneamento de auréolas de alteração hidrotermal de depósitos minerais (Crósta *et al.*, 2003; Ducart *et al.*; 2006; Silva *et al.*, 2009; Crósta e Souza Filho, 2009).

Neste artigo são apresentados os resultados da análise por componentes principais aplicada a uma cena Terra/ASTER e outra TM/Landsat-5, com vistas ao mapeamento de pegmatitos. Representa a continuidade de uma pesquisa mais ampla conduzida nos terrenos do seridó potiguar e paraibano, quando foram utilizadas imagens dos sensores Terra/ASTER e EO-1 Hyperion, com apoio de medidas de reflectância espectral de laboratório e campo (Silva

2009). O trabalho baseou-se no conhecimento dos minerais de pegmatitos caracterizados com medidas espectroscópicas de laboratório e campo usados como guia com o objetivo de mapear estas rochas e avaliar os resultados obtidos.

## 2. Área de estudo

A área de estudo está situada na região limítrofe entre os estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, sendo limitada pelas coordenadas 06° 45' 00" e 07° 15' 00" de latitude sul e 36° 20' 00" e 36° 50' 00" de longitude oeste. É uma região de clima quente, semi-árido, com precipitação pluviométrica escassa e mal distribuída. O relevo é acidentado, com cotas variando de 250 metros a 890 metros de altitude. Suas principais elevações são as Serras das Queimadas, ao norte, e do Bonfim, ao sul, da cidade de Junco do Seridó/PB (Figura 1).

Geologicamente, a área de estudos está localizada na Província Estrutural da Borborema (PB), mais precisamente nas proximidades do Lineamento Patos, na porção sul-sudeste da Faixa Seridó (FSe) (Jardim de Sá, 1994) (Figura 1). A FSe tem como embasamento cristalino as rochas do Complexo Caicó, representadas por metassedimentos, migmatitos e ortognaisses granodioríticos, tonalíticos e graníticos, com idades arquenais a paleoproterozóicas. As rochas supracrustais da Fse estão reunidas no Grupo Seridó, com idade de deposição entre 650-610 Ma e deformação no Ciclo Brasileiro (600 Ma). São rochas submetidas a metamorfismo variando do fácies xisto verde a anfíbolito alto. O Grupo Seridó compreende a Formação Jucurutu (paragnaisses a biotita, epidoto e anfíbolio, mármore e cálcio-silicáticas); a Formação Equador (quartzitos puros, micáceos, intercalações de metagrauvas e metaconglomerados) e a Formação Seridó (biotita xistos com intercalações de mármore, anfíbolitos e cálcio-silicáticas) (Figura 1). São reconhecidas quatro fases de deformação dúctil a dúctil-rúptil, sendo uma fase restrita ao embasamento gnássico-migmatítico e as demais nas rochas supracrustais (Jardim de Sá, 1994).

Johnston Jr. (1945) classificou os pegmatitos em dois tipos, a saber, os homogêneos e os heterogêneos. Os pegmatitos homogêneos exibem composição típica de um granito com quartzo, feldspato e muscovita, e alguma biotita. A forma encontrada desse tipo de pegmatito na área de estudo foi a tabular, com dimensões variando de 1 a 6 metros de largura. A extensão em superfície é muito variável, podendo ultrapassar 3 km, como no caso de um pegmatito observado ao sul do Junco do Seridó (Silva, 2009). Os pegmatitos heterogêneos têm zoneamento interno e são mineralizados em minerais de Be, Ta-Nb, Sn e Li. A forma comumente encontrada é a lenticular, alguns com cerca de 500 metros de extensão e largura da ordem de 40 metros (Silva *et al.*, 2009).

## 3. Metodologia de Trabalho

Foram utilizados como base geológica de referência os mapas geológicos do Projeto Jardim do Seridó, escala 1:50.000 e a Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Folha Jaguaribe SB-24. Como referência para o processamento digital das imagens foram utilizadas curvas de reflectância espectral geradas com o espectrorradiômetro portátil FieldSpec Full Resolution Pro, da Analytical Spectro Devices (ASD). A interpretação das curvas foi realizada com os aplicativos The Spectral Geologist/TSG-5.0 PRO, SIMIS FS 1.6 e do ENVI 4.5. Os dados multiespectrais orbitais constituem um recorte das cenas TM/LANDSAT-5 de 17/10/1999 e Terra/ASTER de 29/01/2006, relativas à órbita 215.65.

No processamento digital das imagens TM/Landsat-5 e Terra/ASTER aplicou-se a técnica Crósta, que consiste de uma adaptação feita por Loughlin (1991) para a metodologia originalmente proposta por Crósta e Moore (1989), denominada de *Feature-oriented Principal Component Selection* (FPCS). Para os dados Landsat foram utilizados os conjuntos

de bandas 1, 3, 4 e 5 para mapear óxidos e hidróxidos de ferro que exibem alta reflexão na banda TM3 e intensa absorção na banda TM1, e o conjunto 1, 4, 5 e 7 para mapear argilominerais portadores do íon hidroxila, com base no fato de que esses minerais exibem alta reflexão na banda TM5 e intensa absorção na banda TM7 (Loughlin, 1991; Crósta e Moore, 1989). Para os dados Terra/ASTER foram usados os conjuntos de bandas 1, 4, 6 e 7 para mapear caulinita, e 1, 3, 5 e 6 para mapear illita-muscovita (Crósta *et al.*, 2003). Além destes conjuntos, utilizou-se ainda o conjunto 1, 4, 5 e 9 para caracterização de limonita. As características espectrais da caulinita são de alta reflexão nas bandas 4 e 5 e baixa nas bandas 1 e 6. Illita-muscovita tem alta reflexão nas bandas 1 e 5 e baixas nas bandas 3 e 6. Limonita apresenta alta reflexão nas bandas 4 e 5 e baixas nas bandas 1 e 9 (Silva, 2009).

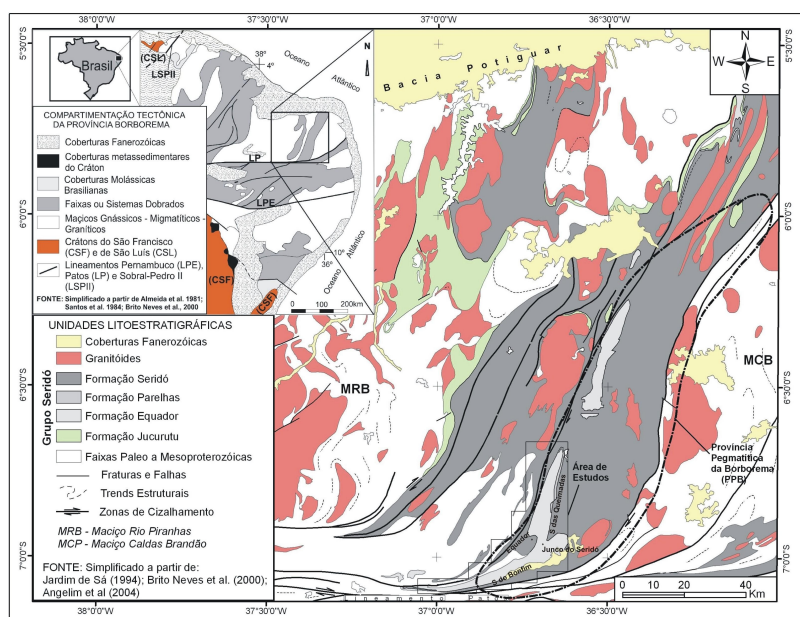


Figura 1 - Geologia regional e localização da área de estudos.

#### 4. Resultados e Discussão

As medidas espectroscópicas de reflectância possibilitaram caracterizar caulinita, muscovita, illita, mica sódica, cookeita, lepidolita e turmalinas (Silva, 2009; Silva *et al.*, 2009).

A Tabela 1 mostra a matriz de autovetores resultante da aplicação da Técnica Crósta ao conjunto de bandas TM1345. Na matriz, a PC3 tem carga positiva da banda TM1, região em que óxidos e hidróxidos de ferro apresentam forte absorção espectral, e carga negativa da banda TM3, região onde estes materiais apresentam alta reflectância espectral.

	TM1	TM3	TM4	TM5
PC 1	0.472896	0.439869	0.353534	0.676682
PC 2	0.657591	0.211509	0.191705	-0.697199
PC 3	0.573807	-0.446502	-0.647732	0.227651
PC 4	<b>0.121199</b>	<b>-0.749943</b>	0.647075	0.064726

Ainda na Tabela 1, a matriz de autovetores mostra que a PC4 tem comportamento similar

ao da PC3, com a carga positiva da banda TM1 e negativa da banda TM3, porém, a PC4 possui maior diferença de gradiente entre as cargas destas bandas, de modo que esta é a PC selecionada para mapear óxidos e hidróxidos de ferro. Em virtude dos sinais contrários, em relação aos espectros de absorção e de reflectância desses minerais, torna-se necessário inverter os sinais da PC4 (multiplicando-a por -1) para mostrar as áreas de ocorrência de óxidos e hidróxidos de ferro em tons claros de cinza (Loughlin, 1991).

A Tabela 2 apresenta a matriz de autovetores resultantes da aplicação da Técnica Crósta ao conjunto de bandas TM1457. A matriz mostra que a PC para mapear argilominerais é a PC4, isto porque ela apresenta carga positiva na banda TM5, região de alta reflectância espectral de argilominerais contendo íon hidroxila, e carga negativa da banda TM7, região onde argilominerais apresentam alta absorção espectral.

Conforme Loughlin (1991), para realçar as misturas de argilominerais e de óxidos e hidróxidos de ferro no terreno é preciso somar a PC3 com a PC4. A imagem resultante dessa adição deve ser mostrada na composição colorida no canal do verde, juntamente com a imagem PC4 (invertida) para minerais de ferro no canal do azul, e a PC4, para argilominerais no canal do vermelho.

TABELA 2 - Matriz de autovetores do conjunto de bandas TM1457				
	TM1	TM4	TM5	TM7
PC1	0.456395	0.343689	0.680573	0.458696
PC2	0.781345	0.283381	-0.427092	-0.356073
PC3	-0.425604	0.890554	-0.065540	-0.146558
PC4	-0.008109	-0.092121	<b>0.591706</b>	<b>-0.800832</b>

Na composição colorida da Figura 2, as áreas com *pixels* em tons de vermelho têm mais componentes de argilominerais do que de óxidos de ferro, enquanto as áreas em tons azuis têm mais óxidos de ferro que argilominerais. As áreas amareladas e esverdeadas representam diferentes proporções de misturas destes grupos de minerais. A banda TM3 foi adicionada à composição colorida através da técnica IHS-RGB para compor a imagem de fundo na composição final, mostrando os aspectos de relevo e drenagem regionais. No retângulo indicado com a letra A ocorrem os pegmatitos Alto do Giz e Amâncio e no retângulo de letra C estão os pegmatitos do setor Samambaia - Aldeia.

Nas Tabelas 3, 4 e 5 são apresentadas as estatísticas da transformação por componentes principais para cada conjunto de bandas Terra/ASTER.

A matriz de autovetores da Tabela 3 mostra que a PC3 recebe carga elevada e negativa da banda 4 e positiva e média/baixa das demais bandas, enquanto a PC4 recebe carga positiva e alta da banda 7 e negativa e baixa da banda 6, com as outras duas bandas contribuindo de modo desprezível para esta PC. A PC4 também apresenta o maior gradiente entre as bandas 6 e 7, bandas estas em que a caulinita exhibe, respectivamente, maior absorção e maior reflexão. Portanto, embora a PC4 seja a mais indicada estatisticamente para mostrar áreas com ocorrência de caulinita, a contribuição da banda 4 na PC3 sugere que a caulinita estaria também representada nessa PC.

A análise visual destas PCs, com apoio de dados de campo, mostrou que, efetivamente, ambas as PCs mapeiam as principais exposições de caulinita nos pegmatitos. Em casos como esse Loughlin (1991) sugere que seja utilizada uma combinação das PCs para mapear com maior fidelidade o alvo de interesse. Para isto procedeu-se à inversão da PC3 e adicionou-se à imagem invertida à PC4, gerando-se assim a imagem de abundância relativa de caulinita.

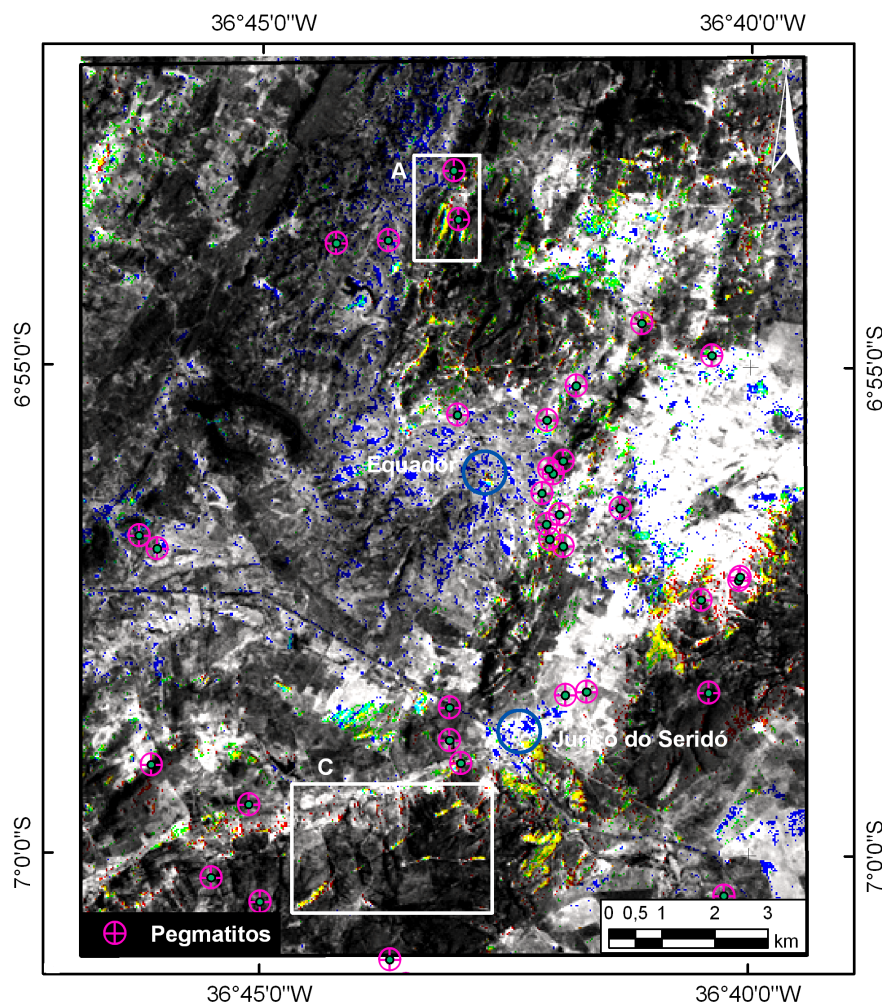


Figura 2 - Composição colorida  $(OH)R - (OH + Fe)G - FeB$  obtida da imagem TM/Landsat-5. Mostra a abundancia relativa de minerais óxidos e hidróxidos de ferro e argilominerais no terreno.

**TABELA 3 - Matriz de autovetores do conjunto de bandas 1467 do Terra/ASTER**

	Banda 1	Banda 4	Banda 6	Banda 7
PC1	0.470325	0.510627	0.505420	0.512449
PC2	0.867558	-0.151169	-0.404594	-0.246568
PC3	0.140388	<b>-0.839250</b>	0.459936	0.253790
PC4	-0.080181	-0.109852	-0.607711	<b>0.782426</b>

Os autovetores mostrados na Tabela 4, relativos à muscovita, indicam que a PC4 tem carga negativa e alta da banda 5 e positiva e alta da banda 6, caracterizando assim o gradiente espectral entre essas duas bandas, que são diagnósticas das principais feições de absorção e reflexão da muscovita. Desse modo, foi selecionada e invertida a PC4 para mapear illita/muscovita em tons claros de cinza (Figura 3).

A matriz dos autovetores da Tabela 5 mostra que a PC4 tem contribuições média/baixa e com valor negativo das bandas 4 e 9, e contribuição positiva e alta da banda 5, sendo a PC selecionada para mapear limonita (Figura 3).

TABELA 4 – Matriz de autovetores do conjunto de bandas 1356 do Terra/ASTER				
	Banda 1	Banda 3	Banda 5	Banda 6
PC1	0.513854	0.457018	0.517411	0.509288
PC2	0.248678	0.729637	-0.420117	-0.478843
PC3	0.819604	-0.508568	-0.153663	-0.214467
PC4	0.048604	0.011078	<b>-0.729504</b>	0.682158

TABELA 5 - Matriz de autovetores do conjunto de bandas 1459 do Terra/ASTER				
	Banda 1	Banda 4	Banda 5	Banda 9
PC1	0.472177	0.509518	0.509173	0.508118
PC2	0.874818	-0.171620	-0.333128	-0.307027
PC3	0.097735	-0.804388	0.148623	0.566850
PC4	0.046798	-0.252782	<b>0.779538</b>	-0.571167

A composição colorida da Figura 3 exibe a imagem de abundância relativa da caulinita em vermelho (C), a da muscovita em verde (M) e a da limonita azul (L). As cores magenta, amarelo e ciano mostram locais onde ocorrem misturas com diferentes combinações e proporções de cada uma dessas fases minerais. A banda 3 do ASTER foi adicionada à composição colorida por meio da técnica IHS-RGB. Os locais indicados com retângulos indicam as áreas de ocorrência dos pegmatitos mapeados como Alto do Giz e Amâncio (A), Cavalito Morto (B) e o *trend* Samambaia - Aldeia (C). O pegmatito Cavalito Morto começou a ser explorado em 2005, de modo que ele não aparece na cena TM/Landsat-5 de 1999 como indicado no retângulo B da composição colorida Terra/ASTER da Figura 3.

A Figura 3 mostra vários locais onde foi mapeada caulinita, representados em tons vermelho na composição colorida. A maioria dos pontos identificados corresponde a garimpos e minas de pegmatitos produtores de caulim. A imagem de abundância relativa da illita/muscovita mapeou zonas de contato de pegmatitos-quartzitos, pegmatitos e locais onde afloram quartzitos da Formação Equador a sudeste e nordeste do Junco do Seridó (Figura 3). Há locais onde não foi possível separar os quartzitos dos pegmatitos com base só nessa imagem, dada a dimensão reduzida destes últimos, como a noroeste de Equador e sudoeste do Junco do Seridó. Por outro lado, também foram poucos os locais sobre os muscovita-quartzitos da Formação Equador onde a illita/muscovita foi mapeada por essa imagem. Isto se deve ao fato de que a vegetação de maior porte que ocorre nas encostas e porções mais elevadas das Serras das Queimadas e do Bonfim encobre outras exposições destas rochas.

A cena Terra/ASTER é posterior aos primeiros períodos de chuva na região, quando então a vegetação da caatinga rapidamente se restabelece, encobrindo áreas de exposição de rochas e solos. A limonita foi mapeada principalmente no entorno da cidade de Equador associada às exposições localizadas do biotita xisto da Formação Seridó. Também ocorre a nordeste desta cidade sobre coberturas colúvio-eluviais. Outras manchas dispõem-se sobre coberturas superficiais no entorno da cidade do Junco do Seridó. Áreas onde ocorre o predomínio de misturas de caulinita+muscovita, caulinita-limonita, e que correspondem às cores amarelo e magenta na Figura 3, não aparecem em grandes quantidades e extensões na cena.



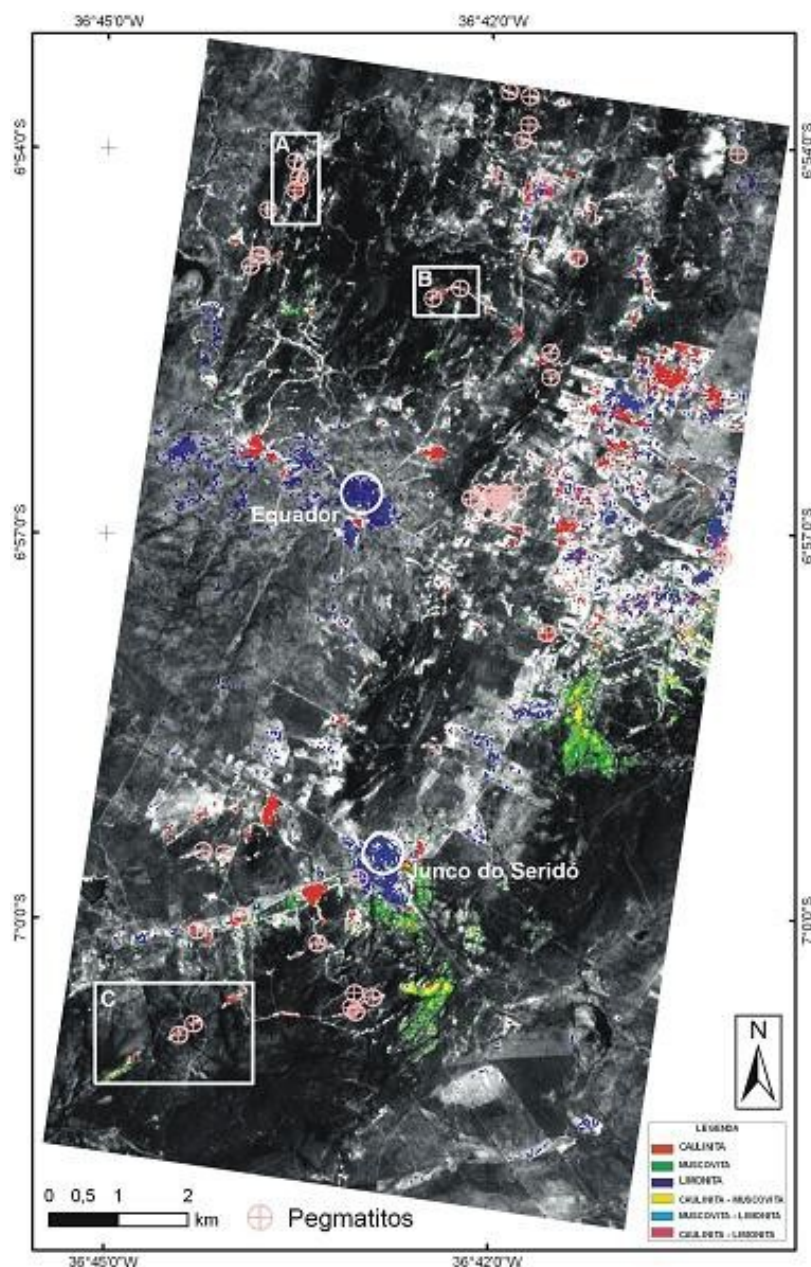


Figura 3 - Composição colorida das imagens de abundância relativa da caulinita-R, muscovita-G e limonita-B obtida.

## 5. Conclusões

As imagens componentes principais TM/Landsat-5 mapearam áreas onde ocorrem óxidos e hidróxidos de ferro e argilominerais que se sobrepõem em parte às áreas mapeadas com abundâncias relativas de limonitas, de caulinita e de muscovita/illita com as imagens componentes principais Terra/ASTER. Nas imagens composições coloridas foram individualizados pegmatitos, muito embora as dimensões reduzidas de muito deles, combinada com a resolução espacial relativamente limitada destes sensores, em particular a resolução espectral do sensor TM, não tenham favorecido uma caracterização mineralógica mais detalhada e a diferenciação de pegmatitos de menores dimensões. Também não foi possível o mapeamento com o sensor ASTER de todos os minerais identificados com a ER. Nos pegmatitos de maior porte e exposição foi possível o mapeamento com a composição colorida das imagens PCs Terra/ASTER da caulinita, da muscovita e da limonita. O conjunto de resultados mostra que a disponibilidade de imagens de épocas mais secas, o que não

ocorreu com a cena Terra/ASTER, certamente contribuiria para o mapeamento, através da exposição de maiores extensões das rochas.

### **Agradecimentos**

À FAPESP pelo apoio financeiro prestado por meio do Processo 2005/05138-4. Aos colaboradores e revisores pelas críticas e sugestões, as quais permitiram o aprimoramento do trabalho. A.P. Crósta agradece ao CNPq pela bolsa de Produtividade em Pesquisa.

### **6. Referencias Bibliográficas**

Crósta, A. P., Moore, J. McM. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: A prospecting case history in greenstone belt terrain. Proceedings of the 7<sup>th</sup> (ERIM) Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology. Calgary 1173-1187p.

Crósta A. P., Souza Filho, C. R. de, Azevedo, F., Brodie, C. 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagônia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. International Journal of Remote Sensing, v. 24. 21: 4233-4240.

Crósta A. P., Souza Filho, C. R. de. 2009. Mineral Exploration with Landsat Thematic Mapper (TM) / Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+): a Review of the Fundamentals, Characteristics, Data Processing and Case Studies. In: R. Bedell, A.P. Crósta & E. Grunsky (Eds.) Remote Sensing and Spectral Geology - Reviews in Economic Geology, v. 16. Society of Economic Geologists (SEG), Littleton, CO, USA. pp. 59-82.

Ducart, D.F.; Crósta, A.P.; Souza Filho, C.R.; Coniglio, J. – 2006 – Characterizing surficial alteration at Los Menucos epithermal district, Patagonia, Argentina, using shortwave infrared spectrometry and ASTER multispectral images. Economic Geology, v. 101, n. 5, pp. 981-996.

Jardim de Sá E. F. J. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileiro/Pan-Africana. Brasília, 803p. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Johnston Jr. W. D. 1945. Os pegmatitos berilo-tantalíferos da Paraíba e Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil. Rio de Janeiro, DNPM-DFPM, 85 p. (Boletim 72).

Loughlin, W. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 57, 1163-1169.

Silva, S.M.P da, Crósta, A.P., Ferreira, F.J.J., Beurlen, H., Silva, A.M., Silva, M.R.R., 2009, Mineralogical characterization and mapping using reflectance spectroscopy: an experiment at Alto do Giz pegmatite in the south portion of the Borborema Pegmatite Province (BPP), northeastern Brazil. *Estudos Geológicos*, volume 19, número 2, pp. 337-342. Agosto 2009. <http://www.ufpe.br/estudosgeologicos/paginas/edicoes/2009192/2009192t65.pdf>

Silva, S. M. P. da. 2009. Espectroscopia de imageamento e gamaespectrometria aérea e terrestre de pegmatitos e granitos da porção sul da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), Nordeste Brasil. Tese de Doutorado. /--Campinas,SP.: [s.n.], 2009. 173 p.