

INTEGRAÇÃO E ANÁLISE DE IMAGENS ASTER E IKONOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE SÍTIOS DE EXPLORAÇÃO MINERAL COM CARACTERÍSTICAS DE ALTERAÇÕES HIDROTERMAIS

Integration and Analysis of ASTER and IKONOS Images for the Identification of Hydrothermally- Altered Mineral Exploration Sites

Paulo Roberto Alves dos Santos^{1 2}

José Carlos Sícoli Seoane¹

Manoel do Couto Fernandes¹

Daniel Bruno de Oliveira¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Instituto de Geociências - IGEO

Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Ilha do Fundão, Cidade Universitária, Rio de Janeiro-RJ

paulo.alves@ibge.gov.br

cainho@geologia.ufrj.br

manoel.fernandes@ufrj.br

alcorao@gmail.com

²Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE

Diretoria de Geociências – DGEO / Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais

Av. República do Chile 500, 15º andar, Centro, Rio de Janeiro-RJ

RESUMO

O Sensoriamento Remoto agrega tecnologia de sensores imageadores e não imageadores, e é uma ferramenta de grande valia no auxílio da pesquisa mineral contribuindo para a identificação, mapeamento e avaliação de diferentes tipos de depósitos minerais. Os sensores orbitais e aerotransportados atuais, permitem obter assinaturas espectrais que podem contribuir na identificação da presença de minerais formados por processos de alteração hidrotermal com deposição de metais como ouro, prata, cobre entre outros. A partir deste contexto o presente trabalho buscou gerar um modelo de classificação que possibilite identificar áreas prováveis para exploração mineral de Cobre (Cu) e Ouro (Au) tendo como base a aplicação de técnicas de Análise de Principais Componentes (APC) às bandas espectrais do sensor multiespectral ASTER. O trabalho foi desenvolvido na Província Mineral de Carajás (PMC), na região de Parauapebas, tendo como balizadores do modelo de classificação proposto todo o arcabouço científico existente sobre as minas de Bacaba, Serra Verde, Alvo 118 e principalmente da mina de Sossego as quais se encontram na área da pesquisa. Os minerais escolhidos como indicadores de áreas prováveis para prospecção de Cu e Au foram a Marialita, Actinolita, Epidoto, Clorita, Biotita e Albita. Cada um destes minerais teve sua curva espectral identificada na Biblioteca Espectral de Minerais do USGS as quais foram posteriormente reamostradas para o comprimento de onda das bandas do sensor ASTER, ou seja, nove bandas do SWIR e VNIR. Estas respostas espectrais possibilitaram determinar os seis conjuntos de quatro bandas cada, que melhor caracterizassem os minerais indicadores. Os resultados apontam que o modelo de classificação aplicado identificou anomalias minerais reconhecidas no terreno, além das já conhecidas na área da pesquisa. Além disso, mostrou eficiência na identificação de áreas que já vêm sendo exploradas como garimpos, pois nestas áreas a movimentação de solo torna abundante em superfície a presença dos minerais indicadores, o que facilita muito o imageamento pelo sensor e conseqüentemente a classificação. Em uma área de aproximadamente 4000 km² foram identificadas cerca de 90 anomalias, classificadas de acordo com o grau de prioridade, sendo 18 de 1ª ordem, 48 de 2ª ordem e 24 de 3ª ordem de prioridade para investigação. Todas as principais ocorrências minerais conhecidas na área foram identificadas, e novas ocorrências foram confirmadas nos trabalhos iniciais de verificação de campo. De maneira geral os minerais identificados do centro para a borda das anomalias foram a Actinolita e Epidoto na porção central da anomalia; Clorita, Albita e Biotita na porção intermediária e a Marialita no halo mais externo.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Alteração Hidrotermal, ASTER, Análise de Principais Componentes.

ABSTRACT

Remote Sensing Technology comprises imaging and non-imaging sensors and is a valuable tool in mineral exploration contributing in the identification, mapping and evaluation of different types of mineral deposits. The current airborne and orbital sensors allow spectral signatures to identify the presence of minerals formed by hydrothermal alteration concomitant to deposition of metals such as gold, silver, copper and others. The current study aimed to generate a classification model that allows the identification of areas likely for mineral exploration of Copper (Cu) and Gold (Au) based on the application of Principal Components Analysis (PCA) techniques to the spectral bands of the multispectral ASTER sensor. The study was conducted in the Carajás Mineral Province (PMC), in Parauapebas, State of Pará, Brazilian Amazon, based on ground-truthing data obtained from publicly available literature on the Bacaba, Serra Verde, Alvo 118 deposits and more importantly on the Sossego copper mine, as guides to the proposed classification model. The minerals chosen as indicative in the process of identifying likely areas for exploration of Cu and Au were Malachite, Actinolite, Epidote, Chlorite, Biotite and Albite. Each of these minerals has its spectral curve identified in the spectral library of minerals from the USGS, subsequently resampled to the ASTER bands wavelength, i.e., the nine bands of VNIR and SWIR. These spectra made possible to establish the six sets of four bands each, which best characterize the indicative minerals. The classification obtained recognized mineral anomalies other than the ones already known in the area of research. Moreover, results show an efficiency in identifying areas that are already being exploited. Because of the soil movement in the surface area, the presence of indicative minerals becomes more abundant, greatly facilitating imaging and therefore its classification. In an area of about 4,000 km² some 90 anomalies and ranked according to priority, with 18 of 1st order, 48 of 2nd order and 24 of 3rd order for posterior investigation. All major known mineral occurrences in the area were identified, and new occurrences have been confirmed in preliminary field checks. Generally speaking, the minerals identified from the core to the border were Actinolite and Epidote; Chlorite, Albite and Biotite in the intermediate portion, and Malachite in the outer halo.

Keywords: Remote Sensing, Hydrothermal Alteration, ASTER, Principal Components Analysis.

1 – INTRODUÇÃO

As geotecnologias reúnem o conjunto de ciências e tecnologias relacionadas à aquisição, armazenamento, processamento e desenvolvimento de aplicações utilizando informações geo-referenciadas. De modo mais específico, estas tecnologias englobam de forma isolada ou em conjunto, o Sensoriamento Remoto, a Cartografia Digital, os Sistemas de Informações Geográficas, a Aerogeofísica, os Bancos de Dados Geográficos (BDGs), a Geoestatística e outras tecnologias, que são consideradas como ferramentas auxiliares da prospecção mineral, além de uma série de análises espaciais. O Sensoriamento Remoto agrega tecnologias de sensores imageadores e não imageadores, e é uma ferramenta de grande importância para a pesquisa mineral contribuindo para a identificação, mapeamento e avaliação de diferentes tipos de depósitos minerais. Os sensores orbitais e aerotransportados atuais permitem obter medidas do comportamento espectral que podem contribuir na identificação da presença de minerais formados por processos de alteração hidrotermal com deposição de metais como ouro, prata, cobre entre outros (Swalf, 2003). O principal objetivo da

pesquisa é gerar um modelo de conhecimento que possibilite identificar áreas com potencial para exploração mineral de Cobre e Ouro a partir da Análise de Principais Componentes (APC) de imagens ASTER apoiada na Biblioteca Espectral de Minerais do USGS, em bibliografias existentes sobre levantamentos geológicos, e da bibliografia existente dos depósitos de Bacaba, Serra Verde, Alvo 118 e principalmente da mina de Sossego que se encontram na área da pesquisa. A publicação sobre a mina de Sossego (óxido de ferro, cobre e ouro) de Monteiro *et al.* (2007), foi utilizada neste trabalho como base para a seleção dos parâmetros para o modelo de mapeamento das zonas de alteração hidrotermal próprias para a exploração mineral na área de Parauapebas.

2 – CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido no Estado do Pará, na Província Mineral de Carajás, abrangendo parte dos municípios de Parauapebas, Marabá, Curionópolis e Canaã dos Carajás. Apesar da dificuldade de

mapeamento imposta pela vegetação a área é bem estudada devido a sua riqueza mineral (Fig. 1).

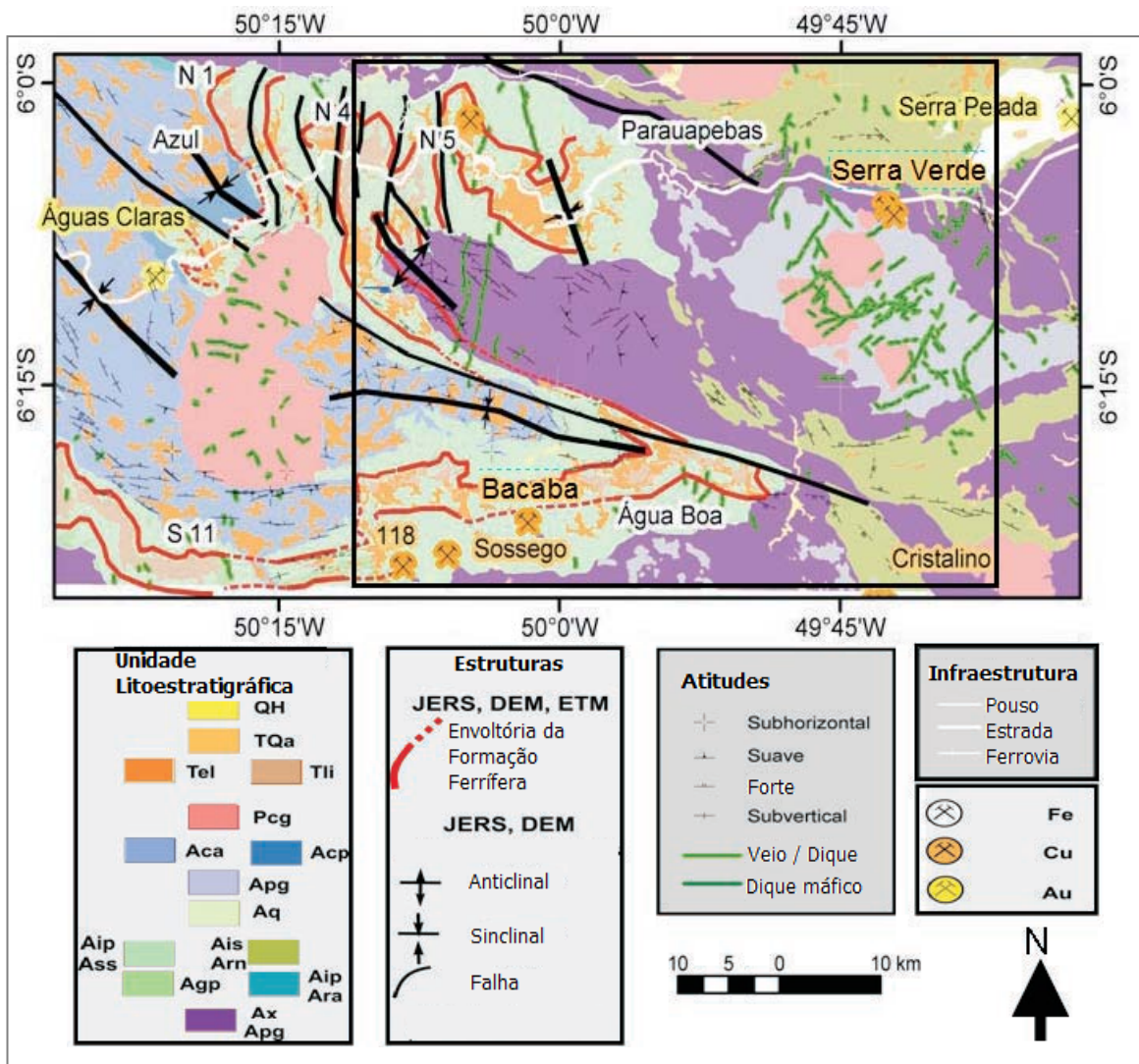


Fig. 1 - Mapa litoestrutural da PMC, com principais recursos minerais. Convenções litoestratigráficas (adaptado de Rosière *et al.*, 2005, baseado na interpretação de imagens Landsat ETM7 RGB 321, 752 e PC1-52): QH – Quaternário–Holoceno: Fm Araguaia; TQa – Terciário-Quaternário: Fm Araguaia; Tel – Terciário: perfil laterítico erodido; Tli – Terciário: carapaça laterítica; Pcg – Palaeoproterozóico: Granito Central Carajás; Aca – Arqueano: Fm Águas Claras, arcósios-arenitos; Acp – Arqueano: Fm Águas Claras, pelitos; Apg – Arqueano: Suites Plaquê (granito-gnaiss) e Estrela; Aip/Ass – Arqueano: Grupos São Sebastião/Igarapé Pojuca; Ais/Arn – Arqueano: Grupo Igarapé Salobo/Rio Novo; Apg – Arqueano: Grupo Grão Pará; Ax/Apg – Arqueano: Cx Xingu e Suite Plaquê. Topografia: SRTM 90 m com lineamentos interpretados de refletores de radar e elementos estruturais de campo.

Embora existam várias versões de mapas geológicos da Província Mineral de Carajás publicados, conforme relatório (CVRD, 2004), considera-se neste estudo a versão de Bizzi *et al.* (2001), com atualização feita por Lobato *et al.* (2002), a partir de mapeamento detalhado de campo nas áreas das minas de ferro da

VALE e de fotointerpretação, conforme compilado por Oliveira (2009). A este foi feito um recorte representando a área de estudo. Lobato *et al.* (2005) apresentaram um esquema geocronológico das unidades lito-estratigráficas da Província Mineral Carajás. Este esquema serve como modelo geocronológico para as unidades de mapeamento

contidas na área de estudo. São apresentadas abaixo, usando as siglas da figura 1:

Complexo Xingu (Ax): Silva *et al.* (1974) descreve este complexo como terrenos granito-gnaissicos tipo tonalito-trondhjemito-granodiorito (TTG). Na área, esta unidade mostra-se disseminada de norte a sul e é a unidade com maior presença. Nela encontram-se rochas do tipo gnaiss Diorítico, metagabro, metavulcânica ultrabásica, ortognaiss, paragnaiss, anfibolito, migmatito, gnaiss granodiorítico, gnaiss granítico e granulito.

Granito Estrela (Apg): O Complexo Granito Estrela (Barros, 1997) é descrito como granitos, sienito e diorito, interpretado como sin-orogênico e intrusivo nas rochas das unidades vulcano-sedimentares do grupo Grão Pará. Essa intrusão gerou uma espessa auréola de metamorfismo de contato. Esse metamorfismo produziu uma xistosidade com direção E-W e milonitização local nas margens do pluton e nas rochas encaixantes. Na área são rochas do tipo leucogranito, granodiorito, granitóides e apresentam-se principalmente ao sul da falha Carajás e em esporádicas áreas ao norte.

Suite Plaquê (Apg): A suite cálcio-alcalina Plaquê compreende corpos intrusivos graníticos do tipo I (arco de ilhas) e de monzonitos alongados com orientação E-W. Na área essa unidade é incorporada ao Granito Estrela tendo a mesma disposição, principais ocorrências ao sul e esporádicas ao norte da Falha Carajás.

Grupo Grão Pará (Apg): Trata-se da mais importante unidade da província Carajás, é nessa seqüência vulcano-sedimentar onde se encontram os depósitos ferríferos explorados pela companhia VALE. O Grupo Grão Pará (Beisiegel *et al.*, 1973) de maneira geral é composto por rochas vulcânicas máficas e félsicas associadas a sedimentos e lentes de Formação Ferrífera Bandada, incluindo jaspilitos. Inicialmente foi descrito com três formações: Formação Parauapebas (base, **Aip**), Formação Carajás e Igarapé Cigarra. Encontra-se principalmente na porção oeste da área e é representado por grandes serras bem destacadas no relevo. De acordo com mapeamento realizado por Lobato *et al.* (2002) os grupos Igarapé Salobo e Rio Novo (**Arn**), foram integrados ao Grupo Grão Pará e tratados como uma só formação, nomeada Formação Igarapé Salobo. Formação Parauapebas é uma unidade vulcânica máfica, representada por rochas vulcânicas básicas apresentando predominância de metabasaltos e metadacitos (Araujo e Maia, 1991). A Formação Carajás é uma unidade de jaspilitos intermediária, composta por formações ferríferas bandadas e corpos de minérios de ferro associados. Os jaspilitos apresentam-se em camadas. A Formação Igarapé Cigarra foi descrita por Macambira *et al.* (2002) como sendo uma unidade superior aos jaspilitos formada por rochas metavulcânicas. A Formação Igarapé Salobo trata-se de uma seqüência metavulcano-sedimentar que recobre discordantemente os gnáisses trondhjemíticos do embasamento (Complexo

Xingu). A seqüência é constituída por quartzitos, anfibolitos, metagrauvacas, BIFs e magnetititos maciços ou foliados.

Grupo Rio Fresco (Formação Águas Claras, Aca e Acp): As rochas metavulcano-sedimentares (Grupo Grão Pará) são cobertas por rochas metassedimentares psamopelíticas da Formação Águas Claras (metarenitos, metacalcarenitos, metassiltitos e metaconglomerados). Essa formação foi anteriormente denominada de Grupo Rio Fresco (DOCEGEO, 1988). Nogueira (1995) propôs a retirada da Formação Águas Claras do Grupo Rio Fresco tornando-a uma unidade a parte e disposta discordantemente sobre o grupo Grão Pará, fato posteriormente descartado (Lobato *et al.*, 2002). Na área esta unidade apresenta-se geograficamente ao sul da Falha Carajás e é envolta pelo grupo Grão Pará, sendo composta de rochas do tipo pelitos, arcoseos, arenitos e conglomerados.

Granito Central Carajás e Granito Cigano (Pcg): Plutons de granito anorogênicos que ocorrem intrudidos tanto no embasamento quanto nas rochas supracrustais. Apresentam-se de forma disseminada na área com maior presença ao norte, são rochas do tipo alcali-granitos, granodioritos e dioritos. Não apresentam orientação preferencial ou qualquer traço de metamorfismo. Lobato *et al.* (2005) sugerem uma interpretação alternativa de que tais granitóides sejam as manifestações intracontinentais de colisão continental distal ao arco magmático propriamente dito, estes representados por ambiente crustal tectônico distensivo, com possível herança radiogênica da placa subductada rasa e da litosfera associada.

À medida que a literatura sobre a Província Mineral de Carajás (PMC) vai se tornando mais abundante, uma melhor descrição dos estilos de mineralizações vai ficando mais evidente, permitindo a identificação de “*halos*” em torno dos principais corpos de minérios da região. Entre as publicações mais recentes sobre a PMC destacamos Monteiro *et al.* (2007) que descrevem as mineralizações do Óxido de Ferro, Cobre e Ouro na mina de Sossego. Monteiro *et al.* (2008) destacam que a Província Mineral de Carajás hospeda importantes depósitos de Cu-Au, com expressivo conteúdo de magnetita, semelhantes a outros depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG) de classe mundial. Dentre estes, destacam-se Salobo, Cristalino, Igarapé Bahia/Alemão, Sossego, Gameleira e Alvo 118 que apresentam como atributos comuns: 1) rochas hospedeiras diversas, na maioria dos casos incluindo unidades metavulcano-sedimentares do Supergrupo Itacaiúnas, conforme definidos por DOCEGEO (1988); 2) associação com zonas de cisalhamento; 3) proximidade com intrusões de diferentes composições (granito, diorito, gabro e diques porfiríticos de composição dacítica ou riolítica); 4) alterações hidrotermais sódica, sódico-cálcica, potássica e

escapolitização intensas, além de cloritização, turmalinização e silicificação; 5) formação de magnetita seguida por precipitação de sulfetos e 6) um amplo intervalo de temperaturas de homogenização (100-570 °C) e salinidades (0 a 69% eq. peso NaCl) em inclusões fluidas em minerais de ganga relacionados aos minerais de minério (Monteiro *et al.*, 2008).

Augusto *et al.* (2008), descrevem a seqüência de alteração hidrotermal do Alvo Bacaba com evidências de albitização inicial, intensa escapolitização, seguida por alteração potássica e formação de magnetita, cloritização/epidotização, mineralização cuprífera e sericitização tardia. Altas salinidades e temperaturas relativamente elevadas (~500°-400° C) são sugeridas para a evolução inicial do sistema devido à predominância de escapolita marialítica. Concluíram que o Alvo Bacaba tem uma seqüência de alteração hidrotermal semelhante à da mina de Sossego, podendo ser porções diferentes do mesmo sistema hidrotermal.

Reis e Villas (2002), sobre o depósito cupro-aurífero de Serra Verde, que conforme sua descrição tem como rochas hospedeiras uma seqüência metavulcanossedimentar arqueana (Grupo Rio Novo), a qual experimentou a ação de três importantes eventos hidrotermais, onde o mais antigo representado por um hidrotermalismo submarino, um segundo relacionado com a intrusão do complexo granítico Estrela, de idade 2,763 Ga, e o último acionado por zonas de cisalhamento de direção preferencial NW-SE.

Torresi (2009) descreve que as zonas de alteração hidrotermal do Alvo 118 são similares àquelas reconhecidas em diferentes profundidades de depósitos IOCG em todo o planeta. O depósito foi submetido a uma alteração regional sódica com formação de albita, e sódico-cálcica, controlada por fluxo de fluidos em zonas de cisalhamento regionais em suas porções mais distais. Esses tipos de alteração são típicos de porções mais profundas de sistemas IOCG. Por outro lado as alterações próximas ao minério mostram padrão típico de porções de níveis crustais rasos de sistemas IOCG. Corpos de hematita-magnetita foram formados por fluidos de baixa temperatura (<250°C) e empobrecidos em $\delta^{18}\text{O}$ com

baixa salinidade e de fontes externas, misturando-se com fluidos formacionais/ metamórficos de alta temperatura e salinidade, que possivelmente interagiram ou incorporaram fluidos magmáticos e de salmouras (Xavier *et al.*, 2009), embora extremamente modificados pela interação com rochas magmáticas e unidades metavulcano-sedimentares. Os metais, e provavelmente o enxofre, foram lixiviados das rochas hospedeiras em extensos sistemas hidrotermais gerados pelo calor de intrusões ou atividade tectônica.

3 – METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida tomando como base a bibliografia mencionada sobre os depósitos de Serra Verde, Bacaba, Alvo 118 e principalmente o zoneamento realizado na mina de Sossego por Monteiro *et al.* (2008) onde foi definida a característica das alterações hidrotermais da área conforme mostrado nas figuras 2a e b.

A imagem do sensor ASTER utilizada foi adquirida em 17/10/2007 com nível 1B, corrigida para geometria e radiometria. As bandas do SWIR, originalmente com 30 metros de resolução espacial, foram reamostradas para a resolução das bandas do VNIR, ou seja 15 metros. As imagens utilizadas na confecção do mosaico Ikonos foram adquiridas ao longo do ano de 2007, nas melhores condições atmosféricas possíveis. Foi utilizada a projeção Equi-Retangular Cilíndrica Normal (sistema de coordenadas geodésicas - latitude/longitude), datum WGS 84. Os minerais escolhidos como indicadores no processo de identificação de áreas prováveis para prospecção de Cu e Au foram: Marialita, uma Na-escapolita, e Albita (alteração sódica), Actinolita e Epidoto (alteração sódico-cálcica), Biotita (alteração potássica) e Clorita (cloritização), conforme sinalizado na figura 3a. Embora os processos de intemperismo e laterização possam mascarar e mesmo modificar a mineralogia original, há evidências de que ao menos parte da mineralogia original esteja preservada em superfície (Monteiro *et al.*, 2008 e observações de campo).

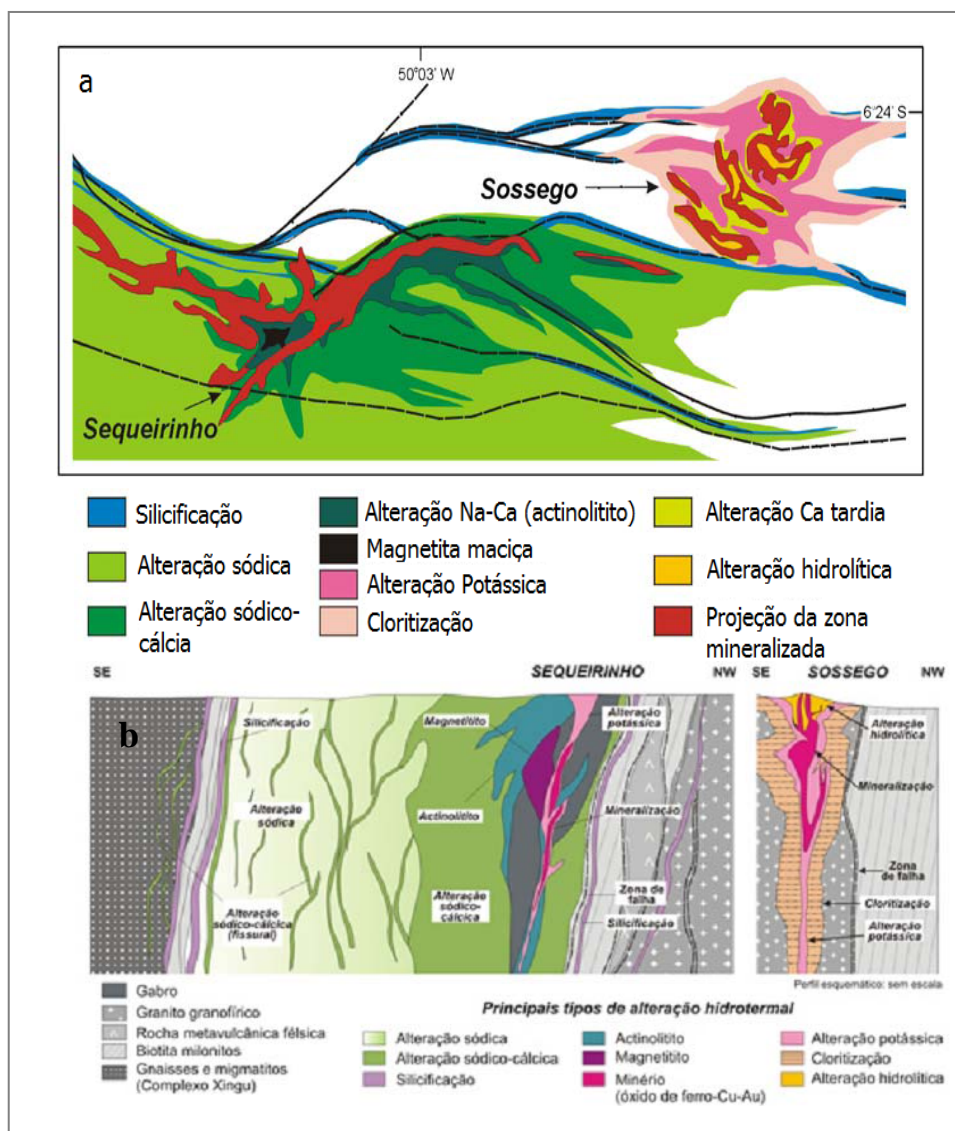


Fig. 2a e b - Zoneamento das alterações hidrotermais da Mina de Sossego, segundo medições de espectralradiometria em amostras de afloramento (a) e testemunhos de sondagem (b), além de mapeamento de campo.
 Fonte: modificado de Monteiro *et.al* (2008).

Cada um destes minerais teve sua curva espectral identificada na biblioteca espectral de minerais do USGS a qual foi posteriormente reamostrada para o comprimento de onda das bandas do sensor ASTER, ou seja nove bandas do SWIR e VNIR (Fig. 3b). Estas respostas espectrais possibilitaram determinar os seis conjuntos de quatro bandas cada, que melhor caracterizassem os minerais indicadores. Os conjuntos de bandas foram definidos como Marialita (bandas 3,5,6 e 7), Actinolita (bandas 2,6,8 e 9), Epidoto (bandas 2,5,8 e 9), Clorita (bandas 2,4,6 e 8), Biotita (bandas 4,7,8 e 9) e Albita (2,4,6 e 7) (Tab. 1). Posteriormente criou-se uma máscara sobre a imagem para neutralizar a influência dos pixels de nuvem e sombra no processamento. Após esta escolha, as bandas foram submetidas à Análise de

Principais Componentes (APC), conforme descrita por Crósta (1992).

A técnica Crósta *et al.* (1989), modificada por Loughlin (1991), entre outras vantagens, dispensa a necessidade de correção atmosférica para sensores multiespectrais (Crósta *et al.*, 2009). Esta análise resultou em quatro novas bandas (bandas PC's) para cada conjunto de quatro bandas espectrais processados. A análise dos conjuntos de 4 bandas PC's para cada mineral foi feita visando identificar a que contém as informações espectrais relacionadas ao mineral específico, com base nas estatísticas fornecidas. Em geral são as bandas PC3 e PC4 que possuem mais informação sobre o mineral de interesse, embora esta última também inclua ruído (Crósta *et al.*, 2003). Esta informação normalmente

representa, em termos quantitativos, uma fração muito pequena do total das informações contidas nas quatro bandas originais, entretanto tem grande importância para

a extração seletiva da resposta espectral do mineral procurado.

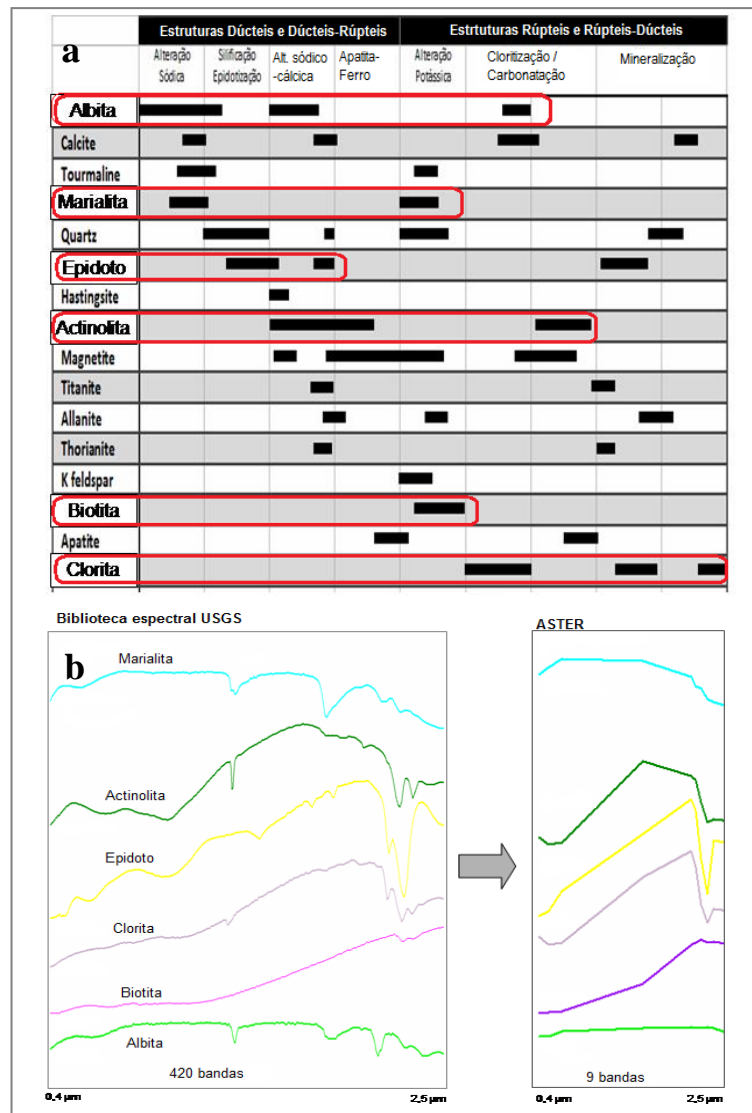


Fig. 3a e b - Minerais indicadores de mineralização (Fig. 3a), adaptado de Monteiro *et.al.*,(2008) e as respostas espectrais originais da biblioteca espectral do USGS e convolvidas para a resolução do sensor ASTER (Fig. 3b).

TABELA 1: CONJUNTO DE BANDAS UTILIZADO NA ANÁLISE DE PRINCIPAIS COMPONENTES (APC) PARA GERAR MAPAS DE ABUNDÂNCIA MINERAL DA REGIÃO DE CARAJÁS.

Alteração mineral	Marialita	Actinolita	Epidoto	Clorita	Biotita	Albita
Bandas	3	2	2	2	4	2
ASTER	5	6	5	4	7	4
	6	8	8	6	8	6
	7	9	9	8	9	7

A partir das áreas identificadas como de provável presença dos minerais indicadores, foram delimitadas as anomalias com maiores indicativos da presença dos seis minerais classificados, que foram vetorizadas, delimitando os polígonos das anomalias da área. Para classificação das anomalias foi considerada a presença simultânea dos seis minerais indicadores e a respectiva área, com limiar de 0,75 km². A partir deste mapeamento foram selecionadas cerca de trinta anomalias que foram visitadas em campo, para verificação dos resultados da classificação e coleta de amostras, para posteriormente submetê-las às análises laboratoriais. Os computadores de mão e os *Laptops* foram carregados com os arquivos dos mapas geológicos, classificação das anomalias, estradas, imagens ASTER e Ikonos e pontos levantados em pesquisas anteriores. Estes dados possibilitaram que os deslocamentos no

campo transcorressem sem imprevistos, já que toda navegação foi feita sobre as imagens da área e as anomalias selecionadas com o GPS navegador (Mio 550 B) e o topográfico (ProMark II), acoplados respectivamente aos computadores de mão e *laptops*. A figura 4 mostra a utilização dos computadores de mão com GPS acoplado, no levantamento de campo.

O levantamento de campo foi feito no período de 4/8 à 14/8/2009, onde foram visitadas cerca de 30 anomalias selecionadas como prioritárias em função de sua classificação quanto ao número de minerais indicadores, bem como a possibilidade de acesso. Neste período percorreram-se aproximadamente 1400 km de estradas e caminhos na área da pesquisa abrangendo partes dos municípios de Marabá, Parauapebas, Canaã dos Carajás e Curionópolis visando validar as informações obtidas da interpretação.



Fig 4 - Verificações de campo nas anomalias selecionadas. No detalhe as telas dos computadores de mão com GPS, exibindo mapas geológicos e imagens de satélite utilizados para localização, bem como delimitação das anomalias selecionadas.

No desenvolvimento da classificação por Análise de Principais Componentes, buscou-se sempre a comparação dos resultados encontrados com o zoneamento da alteração hidrotermal da Mina de Sossego (Monteiro *et. al*, 2008), visando aferir o modelo de classificação para expandi-lo para toda área da pesquisa (Fig. 5a e b).

Nas figuras 5a e b observa-se a anomalia 122 da mina do Sossego da VALE, com o resultado da Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos para melhor visualização dos detalhes, com destaque para os minerais indicadores e a delimitação da anomalia sobre a imagem, caracterizando a mina. O zoneamento desta mina foi utilizado para determinação dos minerais indicadores deste estudo.

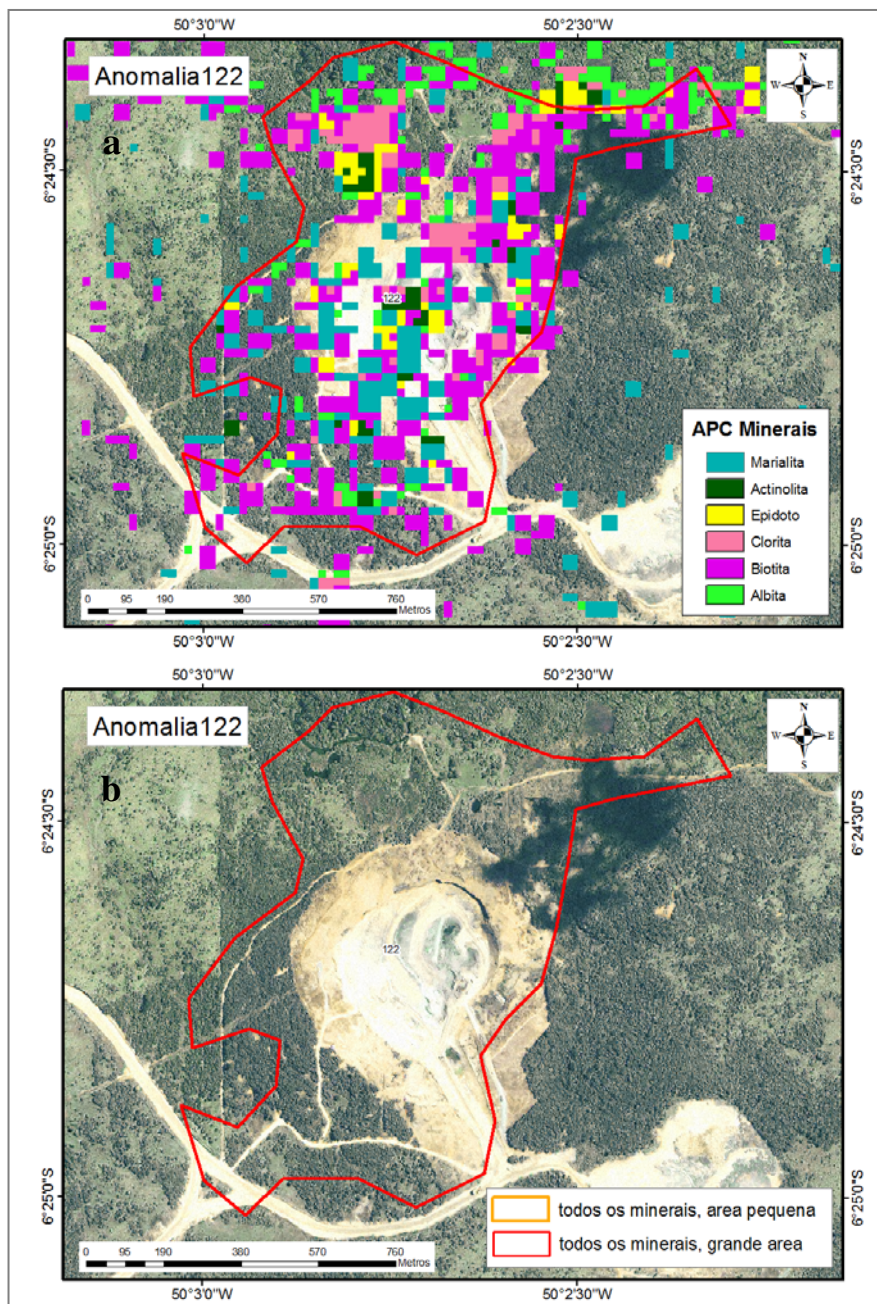


Fig. 5a e b - Mina do Sossego, da VALE, com a classificação da Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos (Fig. 5a) e o contorno da anomalia sobre a mina (Fig. 5b). Comparar com figura 2a.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após confrontar os dados da classificação baseada na Análise de Principais Componentes com o Zoneamento da Mina de Sossego, de Monteiro *et al*, (2008), foi possível extrapolar a classificação para toda a área pesquisada. Entretanto, para avaliar de modo mais rigoroso o método proposto, utilizaram-se dados sobre as mineralizações conhecidas, tais como Serra Verde, Alvo

118, Cristalino e Alvo Bacaba para controlar os resultados encontrados.

Analisando-se as figuras 6a e b, anomalia Serra Verde, pode-se observar que o modelo de classificação empregado identificou o garimpo de Cobre conhecido como Serra Verde, que embora não seja muito extenso é bastante conhecido na região. Este garimpo foi usado no estudo como um ponto de controle da classificação, já que Reis e Villas (2002) o haviam descrito. Na pesquisa de

campo constatou-se a existência de veios de cobre aparente e coletaram-se amostras para desenvolvimento de

estudos em laboratório.

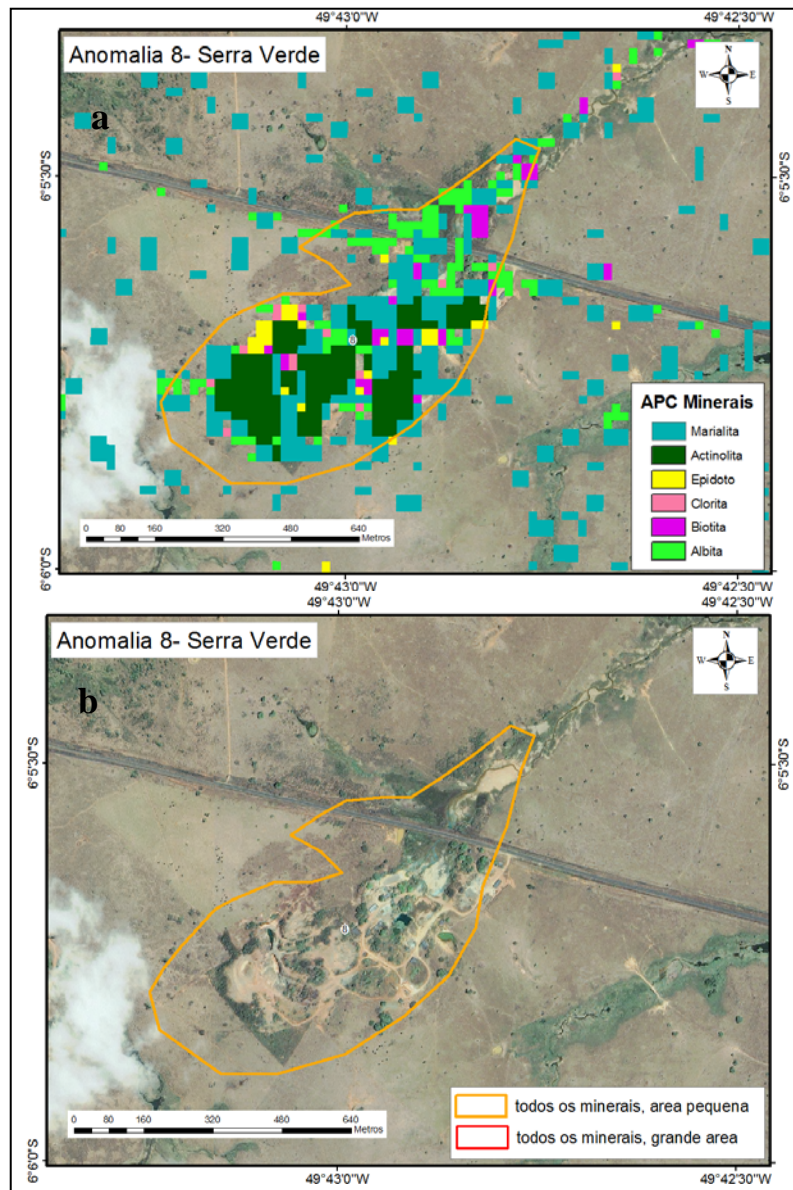


Fig. 6a e b - Anomalia Serra Verde, com a classificação da Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos (Fig. 6a) e o contorno da anomalia identificando atividades de garimpo (Fig. 6b).

As figuras 7a e b, anomalia 125 que corresponde ao Alvo 118 da VALE é uma área bastante conhecida e já descrita por Torresi (2009). Esta anomalia foi utilizada para este trabalho como área de controle. O modelo de classificação identificou a presença dos minerais Marialita, Actinolita, Epidoto Clorita, Biotita e Albita na área de exploração, mesmo com a presença de vegetação em toda a sua extensão. Este resultado, de certa forma surpreendeu, pois a presença de floresta densa dificultaria

a penetração do sinal do sensor ótico, mas mesmo assim a anomalia ficou bem caracterizada.

Observou-se em campo que os pixels anômalos decorrem principalmente do desmate ao longo de caminhos e de áreas abertas para obras de pesquisa (trincheiras e praças de sondagem, parcialmente revegetadas na imagem Ikonos), além de anomalias naturais de vegetação, com menor porte das árvores.

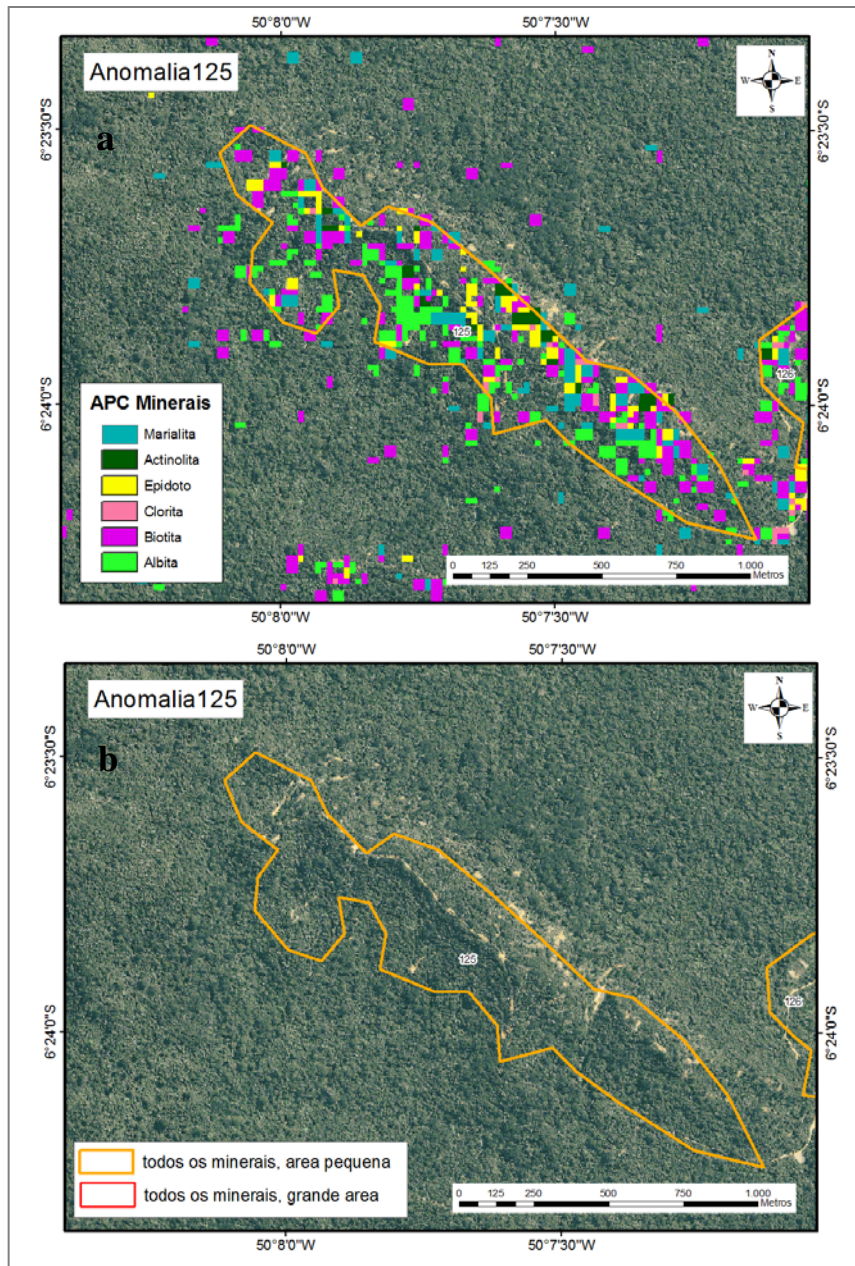


Fig. 7a e b - Anomalia 125, correspondente ao Alvo 118 VALE), com a classificação de Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos (Fig. 7a) e o contorno da anomalia (Fig. 7b).

Nas figuras 8a e b, anomalia 83 (Cristalino), constata-se a presença dos minerais Marialita, Actinolita, Epidoto Clorita, Biotita e Albita da classificação da Análise de Principais Componentes (Fig. 8a). Quando a anomalia é sobreposta às imagens Ikonos (Fig. 8b), observam-se trincheiras para pesquisas minerais a sudoeste da imagem, o que corrobora, com a seleção desta área como prioritária para pesquisa mineral neste estudo. Nesta anomalia foram coletadas amostras, com suas

respectivas coordenadas geográficas, para pesquisas posteriores em laboratório.

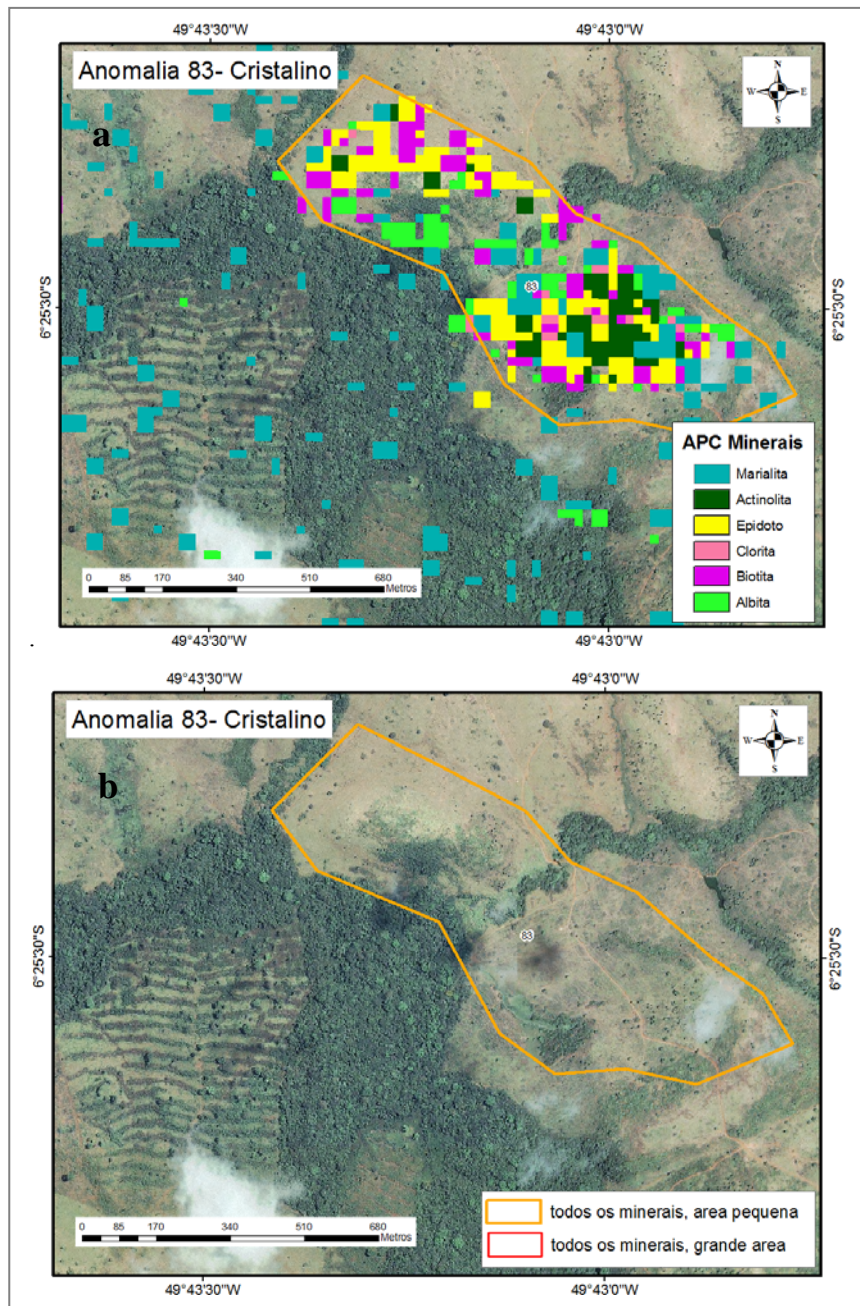


Fig. 8a e b - Anomalia 83 (Cristalino) com a classificação da Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos (Fig. 7a) e o contorno da anomalia (Fig. 7b) onde se pode notar a revegetação a sudoeste da anomalia indicando trincheiras ou outras obras de pesquisa mineral. Estas obras não existiam na data de aquisição de imagem ASTER, ou seja não influenciam na determinação da anomalia.

A anomalia 107 (Alvo Bacaba), mostrada nas figuras 9a e b foi descrita anteriormente por Augusto *et al.* (2008), onde constata-se a presença dos minerais

Marialita, Actinolita, Epidoto, Clorita, Biotita e Albita (Fig. 9a) e indícios da presença de trincheiras para pesquisas minerais no centro da anomalia (Fig. 9b).

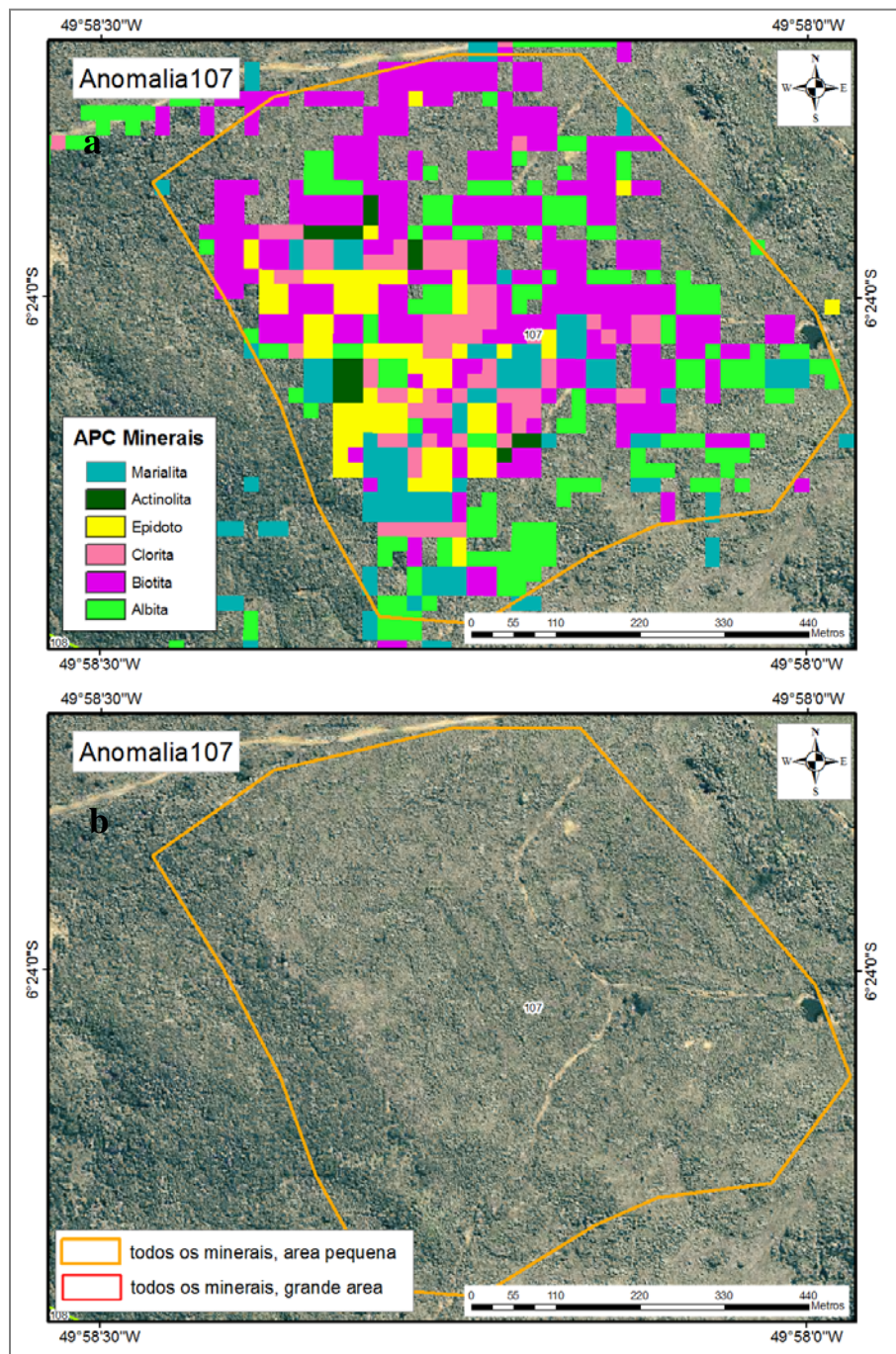


Fig. 9a e b - Anomalia 107 (Bacaba), com a classificação da Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos (Fig. 9a) e o contorno da anomalia com indícios de trincheira para pesquisas minerais já revegetadas no centro (Fig. 9b). Estas obras não existiam na data de aquisição de imagem ASTER, ou seja não influenciam na determinação da anomalia.

As figuras 10a e b, anomalia 138, identificada no campo como garimpo do Melechete, quando analisada sobre as imagens Ikonos, mostra uma série de cavas de garimpo, que foram constatados também na pesquisa de campo, inclusive com a coleta de amostras minerais e

respectivas coordenadas para análises em laboratório. Os garimpos estão semi-abandonados com muito resíduo da prospecção de cobre o que ocasionou uma forte resposta espectral, possibilitando a identificação da anomalia na classificação.

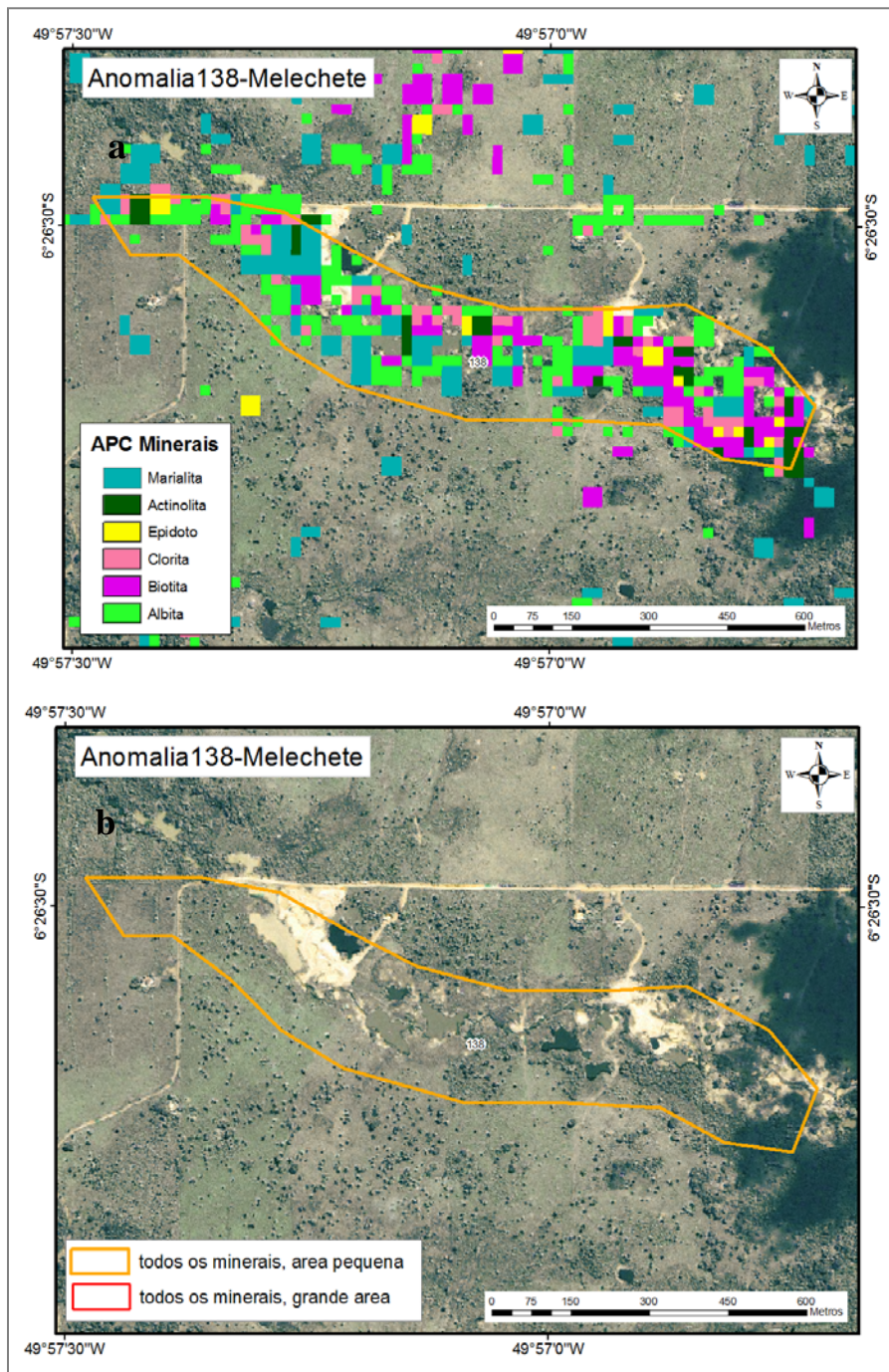


Fig. 10a e b - Anomalia 138 Melechete) com a classificação da Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos (Fig. 10a) e o contorno da anomalia mostrando garimpo em toda extensão (Fig. 10b) com constatação no campo.

Nas figuras 11a e b, a anomalia 38, que apresentou todos os seis minerais indicadores, sendo para o estudo uma anomalia prioritária para a pesquisa de campo. Esta anomalia foi pesquisada através de longas caminhadas visando à identificação de amostras que

servissem para corroborar a classificação em laboratório. No campo constatou-se a existência de várias trincheiras de pesquisa mineral à sudeste da imagem, que foram cavadas posteriormente a data da tomada da imagem (2007), e por isto não aparece na imagem.

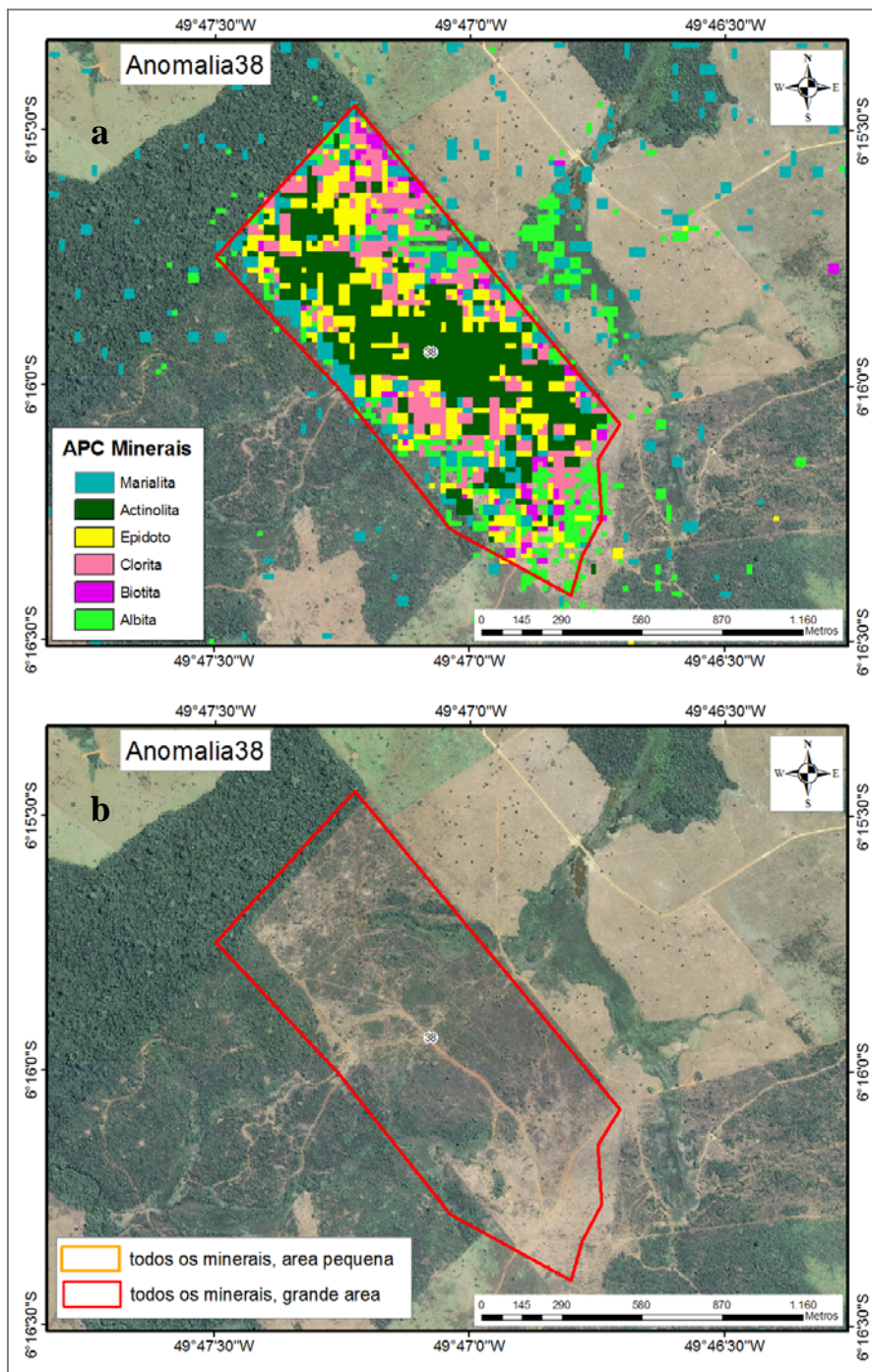


Fig. 11a e b - Anomalia 38 com a classificação da Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos (Fig. 11a) e o contorno da anomalia (Fig. 11b).

As figuras 12a e b mostram a anomalia 139 que foi pesquisada em campo detectando-se a existência de garimpo de menor porte. Nesta anomalia foram coletadas amostras para posteriores análises em laboratório. Apesar

da presença intensa de nuvens no mosaico Ikonos, ainda assim foi possível visualizar a existência de garimpos na parte mais ao sul da anomalia.

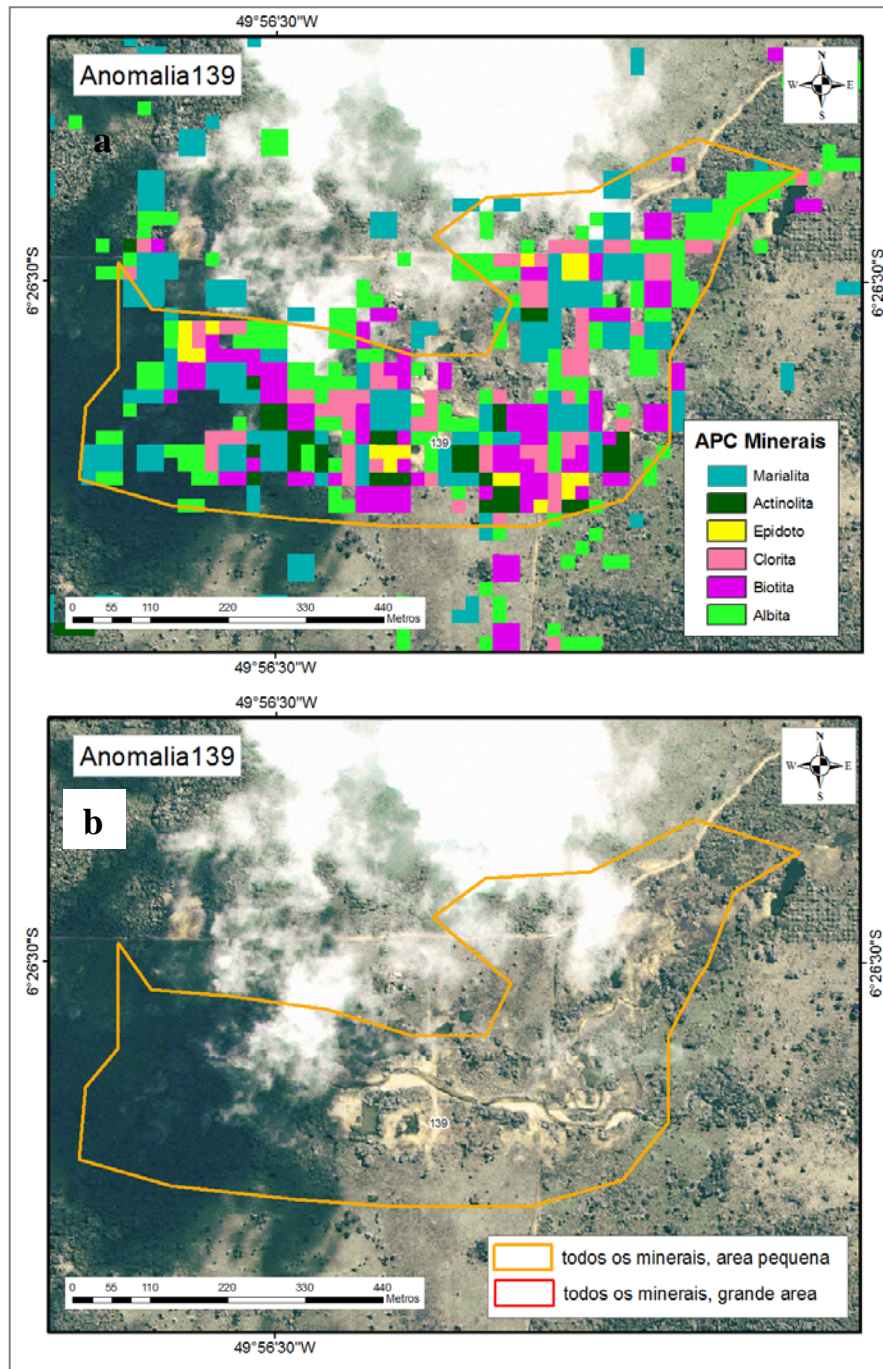


Fig. 12a e b - anomalia 139 com a classificação da Análise de Principais Componentes sobre imagens Ikonos (Fig. 12a) e o contorno da anomalia mostrando garimpo em toda extensão (Fig. 12b) com constatação no campo.

5 – CONCLUSÕES

O confronto entre os resultados e as mineralizações selecionadas para controle (Serra Verde, Alvo 118, Cristalino e Bacaba) mostrou que a classificação realizada na imagem ASTER foi capaz de

identificar de forma bastante concisa estas mineralizações. Na maioria das anomalias investigadas neste trabalho, a alteração hidrotermal produz uma assinatura espectral com zoneamento formando halos. Quando mascarados pela vegetação, no caso do Alvo 118, é observada uma coincidência, mas não com

geometria de halo. No Alvo 118 o modelo de classificação identificou a presença dos minerais Albita, Marialita, Actinolita, Biotita, Clorita e Epidoto na área, mesmo com a presença de vegetação em toda a sua extensão.

Na figura 10, anomalia 138, identificada no campo como Melechete, a confirmação da existência dos minerais pesquisados são os próprios garimpos que proliferam na área, conforme constatado no campo. Na figura 11, anomalia 38, que foi pesquisada em campo, constatou-se a existência de várias trincheiras de pesquisa mineral à sudeste da imagem que foram cavadas após a tomada da imagem (2007), que indiretamente indica existência de minerais de interesse econômico.

Os resultados alcançados mostraram-se bastante animadores, embora a pesquisa ainda esteja em desenvolvimento, pois na sua continuidade está prevista a utilização de laboratório de espectrorradiometria para determinar as curvas espectrais das amostras coletadas em campo, possibilitando assim a comparação entre a classificação de APC e as curvas espectrais das amostras. Da mesma forma está sendo realizada a petrografia para confirmação dos minerais observados na etapa de campo, assim como sua gênese e relação com as mineralizações.

De maneira geral os minerais identificados do centro para a borda da anomalia foram a Actinolita e Epidoto na porção central da anomalia (alteração sódico-cálcica); Clorita (cloritização), Biotita (potassificação) e Albita na porção intermediária e Marialita no halo mais externo (indicando alteração sódica), o que vem corroborar com os resultados previamente encontrados no zoneamento da Mina de Sossego.

A principal conclusão deste estudo é mostrar que é possível identificar alvos para pesquisa mineral a partir de dados bibliográficos e espaciais existentes, confirmando os trabalhos anteriores para outras localidades, diminuindo o tempo e o investimento necessários para descobertas que possam representar novos depósitos minerais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da VALE pela cessão do mosaico de imagens Ikonos, e em especial aos geólogos Benevides Aires e José Antonio Garbellotto de Matteo pela visita à Mina de Sossego e ao Alvo 118. Ao IBGE pelo empréstimo dos computadores de mão com GPS Mio, e também a FAPERJ pelo auxílio financeiro concedido à pesquisa de campo, que possibilitaram a realização deste estudo. Por último agradecemos a Alan Salomão e aos revisores da RBC às muitas contribuições que prontamente foram agregadas ao trabalho.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ARAÚJO, O.J.B. e MAIA, R.G.N. **Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação para a Área do Programa Grande Carajás; Subprograma Mapas Metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais; Folha SB.22-Z-A Serra dos Carajás - Estado do Pará.** DNPM/CPRM. Brasília, 136 p., 1991.

AUGUSTO, R. A., MONTEIRO, L. V. S., XAVIER, R. P., SOUZA FILHO, C. R.- **Zonas de alteração hidrotermal e paragênese do minério de cobre do Alvo Bacaba, Província Mineral de Carajás (PA).** Revista Brasileira de Geociências, n.32, pgs. 263-277, 2008.

BARROS, C.E.M. **Petrologie et structure du Complexe Granitique Estrela (2.5 Ga) et de son encaissant metavolcano-sedimentaire (Province Metallifere de Carajás, Bresil).** Doctor thesis, UniversitS Henri Poincaré - Nancy 1, 316p., 1997.

BEISIEGEL, V.R., BERNADELLI, A.L., DRUMOND, M., KUF, A.W., TREMAINE, J.W. **Geomorfologia/Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás.** Rev. Bras. Geociências, 3:p215-242, 1973.

BIZZI, L., SCHOBENHAUS, C., GONÇALVES, J. H., BAARS, F. J., DELGADO, I. M. O., ABRAM, M.B., LEÃO NETO, R., MATOS, G.M.M., SANTOS, J.O.S. **Mapa geológico do Brasil. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: sistemas de informações geográficas – SIG. Mapas – Escala 1:2.500.000.** CPRM, Brasília, registro digital. 4 CD-Rom., 2001.

COMPANIA VALE DO RIO DOCE, **Atualização dos recursos e reservas provadas e prováveis das minas N4 e N5.** (Relatório Interno - DNPM 852145/1976), Abril – 2004.

CRÓSTA, A., P., and MOORE, J. **Enhancement of landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrain.** International Journal of Remote Sensing, 23, 4827-4852, 1989.

CRÓSTA, A., P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.** Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, Campinas-SP, 1992.

CRÓSTA, A.P., SOUZA FILHO, C.R., AZEVEDO, F., and BRODIE, C., **Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis:**

International Journal of Remote Sensing, v. 24, nº. 21, p. 4233–4240, 2003.

CRÓSTA, A.P., DUCART, D.F, SOUZA FILHO, C.R. **Mineral exploration for epithermal gold in northern Patagonia, Argentina: from regional to deposit-scale prospecting using landsat TM and terra ASTER.** Remote Sensing and Spectral Geology. Reviews in Economic Geology vol. 16 (8): 97-108, 2009.

DOCEGEO **Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás.** In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Anexo Anais, 1-54, 1988.

LOBATO, L. M. ; ROSIÈRE, C.A; BAARS, F. J ; SEOANE, J.C.S. ; SILVA, R.C. **Geologia da Província Mineral Carajás & Geologia dos Depósitos de Ferro.** Belo Horizonte: Dept. Geologia-IGC-UFMG, 2002.

LOBATO, L.M., ROSIÈRE, C.A., SILVA, R.C.F., ZUCHETTI, M., BAARS, F.J., SEOANE, J.C.S., RIOS, F.J., PIMENTEL, M., MENDES, G.E., MONTEIRO, A.M. **A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás - Controle Estrutural e contexto na evolução metalogenética da província.** In: ADIMB/DNPM. Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia. Brasília: DNPM-CT/MINERAL-ADIMB, cap. 2, p.21-92. 782p., 2005.

LOUGHLIN, W.P, **Principal component analysis for alteration mapping:** photogrammetric Engineering and remote sensing, v. 57, p. 1163-1170, 1991.

MACAMBIRA, E. M. B. ; FERREIRA FILHO, C.F. **Fracionamento magmático dos corpos máfico-ultramáfico da Suíte Intrusiva Cateté – Sudeste do Pará.** In: Evandro Luiz Klein; Marcelo Lacerda Vasquez; Lúcia Travasso da Rosa Costa. (Org). **Contribuições à Geologia da Amazônia.** 1 ed. Belém: Sociedades Brasileiras de Geologia - Núcleo Nordeste, v.3, p 105-114, 2002.

MONTEIRO L.V.S., XAVIER R.P., CARVALHO E.R., HITZMAN M.W., JOHNSON C.A., SOUZA FILHO C.R., TORRESI, I. **Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: Paragenesis and stable isotope constraints.** *Mineralium Deposita*, 43:129-159, 2008. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s00126-006-0121-3>.

MONTEIRO L.V.S., XAVIER, R.P., SOUZA FILHO, C.R., AUGUSTO, R.A. **Aplicação de isótopos estáveis ao estudo dos padrões de distribuição das zonas de**

alteração hidrotermal associados ao sistema de óxido de ferro-cobre-ouro Sossego, Província Mineral de Carajás. In: SBGq, Congr Bras. Geoq., 8, Atibaia, CD-Rom, 2007.

NOGUEIRA, A.C.R., Truckenbrodt, W., Pinheiro, R.V.L. **Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescritção e redefinição litoestratigráfica.** Ciências da Terra, (7):p177-197, 1995.

OLIVEIRA, D. B, **Interpretação radargráfica aplicada a modelo SRTM sombreado: mapa lito - textural de uma area em Carajás,** monografia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2009.

REIS, F. N. e VILLAS R. N. **Mineralização e alteração hidrotermal no depósito cupro-aurífero de Serra Verde, Província Mineral de Carajás.** Revista Brasileira de Geociências, n.32, pgs. 69-86, 2002.

ROSIÈRE C.A., BAARS F.J., SEOANE J.C.S., LOBATO L.M., LOPES L., SOUZA S.R.C. **Structure and iron mineralisation in the Carajás Province.** In: **Proceedings Iron Ore 2005, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy,** Publication Series No. 8: 143-150, 2005.

SILVA, G.G., Lima, M.I.C., Andrade, A.R.F., Issler, R.S., Guimarães, G. **Geologia das Folhas SB.22-Araguaia e parte da Folha SC.22- Tocantins.** In: Projeto RADAMBRASIL. Folhas SB.22 – Araguaia e parte da Folha SC.22 – Tocantins, DNPM Rio de Janeiro, (Levantamento de Recursos Naturais, 4), 1974.

SWALF, P. S. **Of the Morro do Ouro Gold Deposit, Minas Gerais, Brazil, Using Reflectance Spectrometry: Application To Mineral Exploration Using Spaceborne Multispectral Sensors 1 2,** Revista Brasileira de Geociências, v. 33 (2-Suplemento): p. 221-227, 2003.

TORRES, I, **Evolução química e isotópica dos fluidos associados à mineralização de Fe-Cu-Au do depósito Alvo 118, Província Mineral de Carajás (PA).** Tese de Mestrado do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, SP, 2009.

XAVIER, R.P., RUSK, B., EMSBO, P., MONTEIRO, L.V. S., TORRESI, I. **Cu-Au systems of the Carajás Mineral Province, Brazil: Composition and source of salinity of the ore-bearing fluids.** II Simpósio Brasileiro de metalogenia, Gramado-RS, Brazil, 2009.