

**UFRGS – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
SUL**

CEPSRM – CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO
REMOTO E METEOROLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**AVALIAÇÃO DE IMAGENS DO SENSOR ASTER PARA
CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DE REJEITOS DE
GARIMPOS DE AMETISTAS**

PAULO ROBERTO MARKOSKI

PORTO ALEGRE, ABRIL DE 2006

**UFRGS – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
SUL**

CEPSRM – CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO
REMOTO E METEOROLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**AVALIAÇÃO DE IMAGENS DO SENSOR ASTER PARA
CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DE REJEITOS DE
GARIMPOS DE AMETISTAS**

PAULO ROBERTO MARKOSKI

Bacharel em Informática

Orientadora: Prof. Silvia Beatriz Alves Rolim

Dissertação apresentada como requisito
parcial para obtenção do Grau de mestre
em Sensoriamento Remoto, na Área de
concentração em Recursos naturais e do
meio Ambiente

PORTO ALEGRE, ABRIL DE 2006

Aos meus Pais, Célio e Ivone, pelo vida e força
minha Orientadora Silvia pela ajuda e amizade
e ao Ernani, pelo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas e instituições e que me ajudaram a vencer mais esta etapa.

Especificamente:

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro.

Ao CEPSRM/UFRGS, pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Aos professores do CEPSRM/UFRGS pelo conhecimento compartilhado.

Á minha Orientadora Profa. Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim, pelo conhecimento transmitido, pela orientação, pela amizade e ajuda na realização de todas as etapas deste trabalho.

Aos meus colegas de turma, pelo estudo conjunto, pelo carinho e incentivo sempre demonstrados.

A meus pais por sempre acreditarem na importância do estudo.

AVALIAÇÃO DE IMAGENS DO SENSOR ASTER PARA CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DE REJEITOS DE GARIMPOS DE AMETISTAS

RESUMO

Este trabalho buscou avaliar os aspectos relacionados à potencialidade das imagens do sensor Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) para a caracterização e mapeamento de rejeitos de garimpos de ametistas na região do município de Ametista do Sul-RS, Brasil. Essa região possui a maior produção de ametistas do mundo. Foram utilizados classificadores de Distância Mínima Euclidiana, Máxima Verossimilhança e a técnica SAM (Spectral Angle Mapper). Entre os três algoritmos de classificação empregados, o melhor desempenho foi observado na técnica SAM, a qual obteve o menor erro e a melhor distinção do alvo em estudo. O principal erro encontrado para os classificadores foi a confusão gerada entre as classes “sombra” e “rejeitos de garimpos”. Com a utilização da técnica SAM, essa confusão foi reduzida consideravelmente, pois a mesma utilizou a curva espectral do rejeito como referência na classificação, enquanto os classificadores multiespectrais utilizaram grupos de pixels representativos do basalto, que continham mistura espectral de outras classes, como sombra e vegetação. Os resultados sugerem que, em ambientes tropicais similares aos da área de estudo, com predomínio de vegetação densa, os dados ASTER podem ser eficazes para a caracterização dos rejeitos de garimpos.

VALIDATION OF ASTER IMAGES FOR CHARACTERIZATION AND MAPPING OF AMETIST MINING RESIDUES

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the potential of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images, for discrimination and mapping of amethyst mining residues/basalt in the Ametista do Sul region, Rio Grande do Sul State, Brazil. This region provides the most part of amethyst production of the World. The multispectral algorithms Minimum Euclidian Distance and Maximum Likelihood and the hyperspectral technique SAM (Spectral Angle Mapper) were used in this work. The SAM technique showed better results than multispectral techniques. The main error found by the multispectral algorithms was the mixing/confusion between "shadow" and "mining residues" classes due to the spectral similarity between them. With the SAM technique the confusion decreased because it employed the residues spectral curve as a reference, while the multispectral techniques employed pixels groups that could have spectral mixture with other targets. The results showed that in tropical terrains as the study area, ASTER data can be efficacious for the characterization of mining residues.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 APRESENTAÇÃO	10
1.2 JUSTIFICATIVA/OBJETIVOS	14
1.3 DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO.....	15
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	17
2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	17
2.2 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	18
2.2.1 <i>Geomorfologia</i>	18
2.2.2 <i>Caracterização dos rejeitos</i>	25
3. REFERENCIAL TEÓRICO	28
3.1 O SENSOR ASTER	28
3.2 TIPOS DE CLASSIFICAÇÃO E CLASSIFICADORES MULTIESPECTRAIS.....	29
3.3 ESPECTROSCOPIA DE IMAGEAMENTO.....	32
3.4 CLASSIFICADORES HIPERESPECTRAIS	34
4. MATERIAL E MÉTODOS	38
4.1 MATERIAIS	38
4.2 PROGRAMAS	38
4.3. MÉTODOS	39
5. RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	42
5.1 COLETA DE PONTOS DE GARIMPOS	42
5.2 GEORREFERENCIAMENTO DA IMAGEM ASTER.....	45
5.3 CLASSIFICAÇÕES DA IMAGEM ASTER	45
5.3.1 <i>Histogramas das amostras</i>	46
5.3.2 <i>Caracterização visual das amostras de treinamento</i>	48
5.3.3 <i>Resultados obtidos nas classificações</i>	51
5.4 APLICAÇÃO DA TÉCNICA SAM NA IMAGEM ASTER	56
6. CONCLUSÕES	61
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE DEPÓSITO DE GEMAS NO ESTADO DO RS.....	12
FIGURA 2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (AMARELO) E ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE AMETISTA DO SUL (TRACEJADO BRANCO) (IMAGEM ASTER R:2, G:3, B:1).....	17
FIGURA 3. PERFIL GEOLÓGICO ENTRE IRAI E FREDERICO WESTPHALEN, MOSTRANDO A SEQUÊNCIA DE DERRAMES.....	22
FIGURA 4. SEGUNDA EXEMPLIFICAÇÃO DO DERRAME TIPO I.....	23
FIGURA 5. REJEITO EXTRAÍDO DOS GARIMPOS DE AMETISTA.....	25
FIGURA 6. REJEITOS RETIRADOS DURANTE A EXTRAÇÃO DE GEODOS DE PEDRA AMETISTA.....	26
FIGURA 7. DETALHE DO REJEITO EXTRAÍDO NO PROCESSO DE EXPLORAÇÃO DE PEDRAS AMETISTA.....	27
FIGURA 8. REJEITOS EXTRAÍDOS DURANTE A EXPLORAÇÃO DE AMETISTAS.....	27
FIGURA 9. HISTOGRAMA REPRESENTANDO A “FRONTEIRA DE DECISÃO” ENTRE DUAS CLASSES COM SOBREPOSIÇÃO NOS VALORES DE AMOSTRAS.....	31
FIGURA 10. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA TÉCNICA SAM.....	35
FIGURA 11. CURVA DE RESPOSTA ESPECTRAL PARA A CLASSE SOLO EXPOSTO EXTRAÍDA DA IMAGEM ASTER DA ÁREA DE ESTUDO.....	37
FIGURA 12. CURVA DE RESPOSTA ESPECTRAL PARA A CLASSE SOLO EXPOSTO EXTRAÍDA DA IMAGEM ASTER DA ÁREA DE ESTUDO.....	37
FIGURA 13. LOCALIZAÇÃO DOS 16 PONTOS DE REJEITOS COLETADOS NO MUNICÍPIO DE AMETISTA DO SUL).....	43
FIGURA 14. MAPA DIGITAL DE ELEVAÇÃO EM 3 DIMENSÕES CONTENDO OS PONTOS DE REJEITOS COLETADOS EM CAMPO.....	44
FIGURA 15. EXEMPLO DE EXPLORAÇÕES REALIZADAS EM COTAS ERRADAS DO DERRAME BASÁLTICO. DOS 2 NÍVEIS ABERTOS, APENAS O INFERIOR POSSUI MINERALIZAÇÃO.....	44
FIGURA 16. HISTOGRAMAS DAS AMOSTRAS DE CLASSES RETIRADAS DA IMAGEM ASTER (BANDA 2).....	48
FIGURA 17. FOTOS DOS REJEITOS RETIRADOS DOS GARIMPOS.....	49
FIGURA 18. EXEMPLOS DE AMOSTRAS UTILIZADAS NAS CLASSIFICAÇÕES POR MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA E DISTÂNCIA MÍNIMA EUCLIDIANA. (A) ÁGUA DE LAGOAS; (B) ÁGUA DE RIOS; (C) AGRICULTURA; (D) MATA; (E) SOLO EXPOSTO CLARO; (F) SOLO EXPOSTO ESCURO; (G) CAMPOS; (H) SOMBRA;.....	50
FIGURA 19. CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO DE DISTÂNCIA MÍNIMA EUCLIDIANA.....	53
FIGURA 20. CLASSIFICAÇÃO PELO MÉTODO DE MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA.....	54
FIGURA 21. COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS CLASSIFICAÇÕES: DISTÂNCIA MÍNIMA EUCLIDIANA E MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA RESPECTIVAMENTE.....	55
FIGURA 22. CURVA DE RESPOSTA ESPECTRAL REPRESENTADA EM CONTADORES DIGITAIS DO REJEITO EXTRAÍDA DAS BANDAS DO ASTER.....	56
FIGURA 23. IMAGEM “RULE” GERADA NO PRIMEIRO PROCESSAMENTO.....	57
FIGURA 24. IMAGEM <i>RULE</i> RECLASSIFICADA.....	58
FIGURA 25. PONTOS DE REJEITOS DE GARIMPOS (EM VERMELHO).....	59
FIGURA 26: PONTOS DE REJEITOS DE GARIMPOS (EM VERMELHO). OS CÍRCULOS VERMELHOS SÃO OS PONTOS DE REJEITOS QUE NÃO FORAM IDENTIFICADOS CORRETAMENTE NA IMAGEM ASTER.....	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SENSOR ASTER.	28
TABELA 2. COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE UTILIZADOS PARA A CORREÇÃO GEOMÉTRICA.	40
TABELA 3. COORDENADAS UTM DOS GARIMPOS ONDE FORAM COLETADOS OS PONTOS.	42
TABELA 4. DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS DE CLASSES UTILIZADAS NA CLASSIFICAÇÃO POR DISTÂNCIA MÍNIMA EUCLIDIANA E MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA	45

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A Província Ígnea Continental do Paraná tem se destacado nas duas últimas décadas como objeto de investigação de várias pesquisas direcionadas à caracterização química (Piccirillo & Melfi, 1988), isotópica (Mantovani *et al.*, 1985 e Marques *et al.*, 1999) estratigráfica (Peate *et al.*, 1992), geofísica (Vidotti *et al.*, 1998), geocronológica (Renne *et al.*, 1992), geodinâmica (Tumer *et al.*, 1996) e metalogenética (Mincato & Schrank, 1998). Neste projeto é dada ênfase à validação do sensor ASTER no mapeamento de alvos minerais de dimensões restritas em ambiente de atividade antrópica e cobertura vegetal significativas. A proposta baseia-se na caracterização e identificação de material de rejeito das minerações de ametista utilizando técnicas exploratórias de processamento digital de dados de sensores remotos orbitais (Plataforma EOS-TERRA).

O Sensoriamento Remoto e as técnicas auxiliares de computação são importantes ferramentas utilizadas para a identificação, mapeamento geológico e exploração mineral. Estas ferramentas visam à discriminação espectral de alvos, através do uso de imagens de sensores multiespectrais e hiperespectrais.

Segundo Lima (2004), a utilização de dados de sensoriamento remoto tem sido importante na minimização de custos e tempo em campanhas de pesquisa e exploração mineral. Estudos utilizando estes dados têm sido realizados com maior sucesso em regiões áridas e semi-áridas do mundo, onde ocorrem maiores áreas com materiais expostos, permitindo aquisição direta da informação espectral da assembléia rocha-solo. Em ambiente tropical, a caracterização das propriedades espectrais de rochas e solos é normalmente influenciada pela cobertura vegetal. Desta forma, investigações minerais utilizando sensoriamento remoto podem explorar o fato de que mudanças sutis na cobertura vegetal podem

refletir alterações nas condições do substrato, constituindo associações rocha-solo-vegetação e, também, o grau de exposição de rocha-solo na cena imageada.

A variedade de quartzo de cor violeta, denominada ametista, é a mais apreciada e valorizada dentre os minerais da família da sílica, sendo utilizada pelo homem desde os primórdios da civilização (Juchem, 1999).

Atualmente, dentre os vários países produtores, o Brasil situa-se como um dos maiores fornecedores mundiais desse bem mineral, destacando-se o Rio Grande do Sul como o maior produtor nacional. Neste estado, são conhecidas extensas jazidas de ametista, em depósitos de geodo em Basalto (Bossi & Caggiono, 1974), na Formação Serra Geral. A Figura 1 ilustra o mapa de depósito de gemas no Estado do Rio grande do Sul, onde são mostradas as jazidas em exploração e as ocorrências com potencial favorável a exploração.

O setor de geodos ou “gemas” no Rio Grande do Sul tem se caracterizado pela exportação de grandes quantidades de pedras brutas e de pequena quantidade de produtos parcial ou totalmente elaborados com baixo valor agregado. Grande parte das empresas foi originada a partir de famílias agrícolas que possuíam jazidas em suas terras e começaram a garimpar a ametista e a ágata, vendendo sua produção para imigrantes alemães que se instalaram neste estado. Estas famílias deram origem às primeiras indústrias de beneficiamento de gemas, uma atividade relativamente recente que possui aproximadamente três décadas. Até hoje as condições de trabalho são bastante precárias em relação à técnica e segurança de trabalho, sendo os produtos manufaturados bastante primitivos e repetitivos, em geral de qualidade inferior aos industrializados no exterior.

O Rio Grande do Sul é responsável por cerca de 50% do volume total de gemas produzidas no Brasil e 25% do total das exportações (Souza, 1996); a ágata e a ametista são as gemas mais produzidas, respondendo esse estado por quase metade das exportações dessas duas gemas. O volume e a qualidade da ametista produzida fazem do Rio Grande do Sul um dos mais importantes

fornecedores dessa gema para o mercado internacional. Apesar da importância econômica que representam as minerações para a economia deste estado, os depósitos de ametista e ágata são ainda pouco conhecidos sob o ponto de vista geológico e mineralógico, tendo como consequência o baixo grau de aproveitamento dos mesmos.

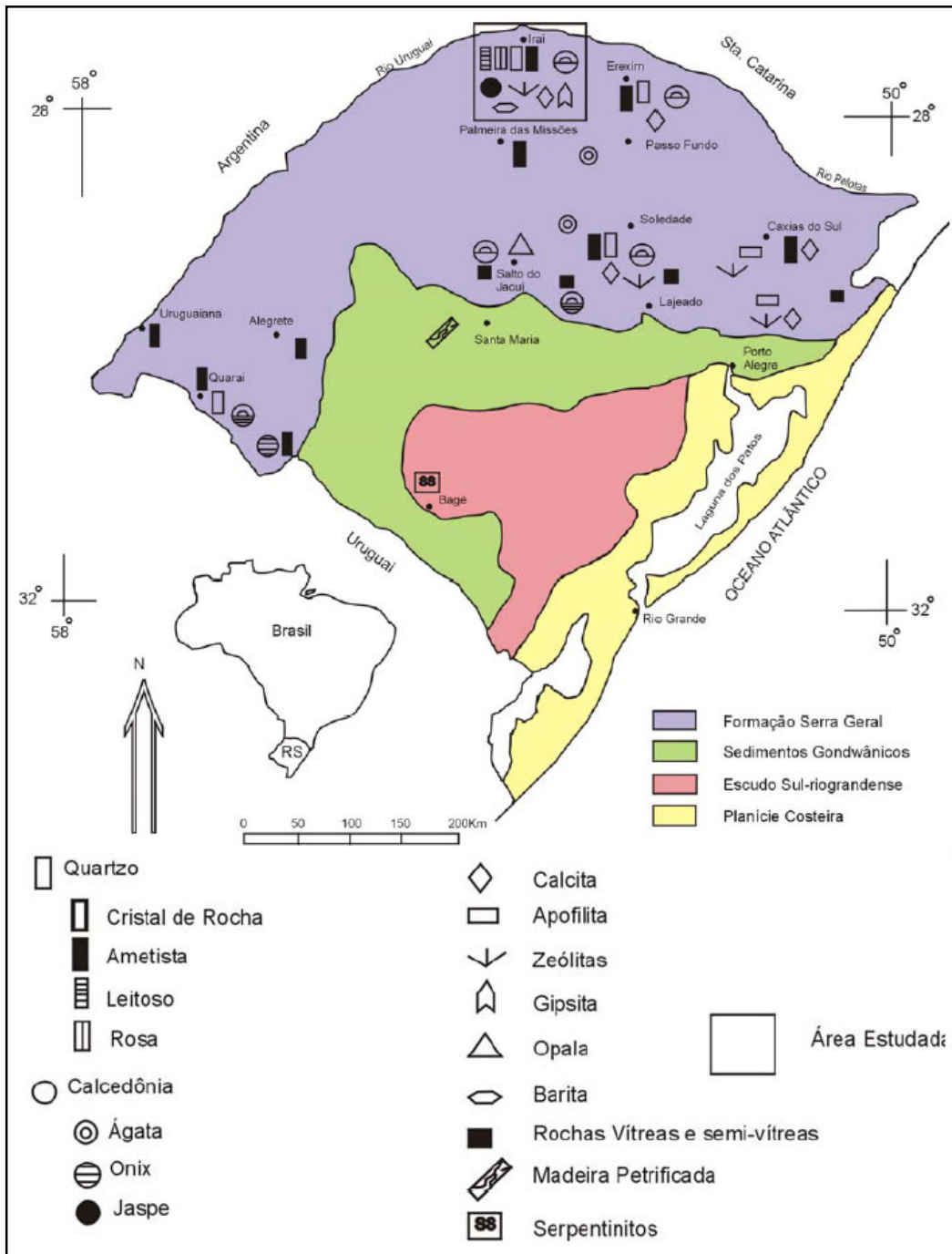


Figura 1. Mapa de depósito de gemas no Estado do RS.
 Fonte: Juchem (1999)

As principais jazidas de ametista estão situadas na região do Alto Uruguai, norte do Rio Grande do Sul, abrangendo parte dos municípios de Iraí, Frederico Westphalen, Ametista do Sul, Alpestre, Rodeio Bonito e Planalto. Nessa região, em uma área de aproximadamente 300 km², existem mais de 300 áreas de garimpos de ametista, onde a extração é feita na rocha inalterada em galerias horizontais subterrâneas que atingem em média 50 a 100 metros de comprimento e por vezes em lavra a céu aberto. A produção atual na região é de aproximadamente 100 toneladas/mês de pedra bruta, estando incluído neste montante além dos geodos com ametista, a ágata, a calcita e a gipsita.

Os dados utilizados para extrair as informações de interesse em aplicações de sensoriamento remoto são normalmente provenientes de sensores multiespectrais como, por exemplo, do Landsat 5 e 7/Thematic Mapper (TM) ou do SPOT 3/High Resolution Visible (HRV). Estes sensores possuem resolução espectral entre três e sete bandas.

Novas perspectivas foram abertas para a discriminação de alvos geológicos com o advento das imagens do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo do satélite Terra. Ele representa um avanço, em termos de resolução espectral, quando comparado ao instrumento ETM (*Enhanced Thematic Mapper ETM**) do satélite Landsat-7. Trabalhos como o de Van der Meer (1999) já discutiam o potencial do sensor ASTER para a detecção de alguns minerais, como a caulinita e muscovita. Esses dois minerais são caracterizados por uma banda de absorção em aproximadamente 2,2 µm devido à hidroxila (OH) (Hunt, 1977) correspondente à banda 6 do sensor ASTER (2,185 – 2,225 µm).

Crosta *et al.* (2002) utilizaram dados do sensor ASTER para caracterizar halos de alteração hidrotermal em depósitos auríferos epitermais no distrito de Los Menucos, Argentina. Foram utilizadas tanto técnicas usualmente empregadas no processamento de imagens multiespectrais, como também técnicas hiperespectrais. Segundo os autores, os resultados foram bastante satisfatórios,

demonstrando os benefícios que a recente disponibilização de imagens orbitais multiespectrais de melhor resolução espectral pode trazer para atividades de exploração mineral.

Para a utilização plena deste volume de informação exige-se um conhecimento cada vez mais detalhado do comportamento espectral dos alvos, realizado por meio da Espectroscopia de Reflectância, tanto de campo como de laboratório. Isto só é possível com o desenvolvimento de técnicas (instrumentação de coleta e metodologia de análise) apropriadas ao grande volume de dados resultante. Para isso, tem-se buscado um melhor entendimento nas relações existentes entre as curvas espectrais e as características específicas dos alvos que permitam sua separação e/ou caracterização.

1.2 Justificativa/Objetivos

Dentre as atividades extrativistas, o garimpo é uma das que mais contribui para a degradação do meio ambiente. Desenvolvido através de técnicas rudimentares, tem como conseqüências mais drásticas o desmatamento de matas, o acúmulo de uma grande quantidade de detritos no meio ambiente sem falar nos riscos a vidas humanas devido ao uso de explosivos, muitas vezes sem qualquer equipamento de segurança.

A despeito dos problemas ambientais envolvidos, a atividade garimpeira constitui uma importante fonte de renda, talvez a única, para uma parcela significativa de gaúchos na região norte do Estado do Rio Grande do Sul. Por isso, torna-se cada vez mais urgente, a criação de normas que possam ordenar e estabelecer alguma forma de controle da atividade garimpeira. Outra necessidade imediata diz respeito à tomada de ações concretas por parte de órgãos governamentais, direcionada à recuperação ambiental das áreas já destruídas. O primeiro passo concreto a ser tomado para efetivar essa ação é um levantamento diagnóstico das áreas já degradadas.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o uso de imagens do sensor ASTER, juntamente com técnicas de sensoriamento remoto, para o mapeamento e identificação de basalto retirado de garimpos de pedra ametista no município de Ametista do Sul, porção norte do Estado do Rio Grande do Sul.

Mais especificamente, os objetivos foram:

- a) Avaliar o desempenho de diferentes técnicas de processamento digital de imagens na caracterização de garimpos de ametistas;
- b) Avaliar o potencial das imagens ASTER para a detecção e mapeamento de rejeitos de garimpos ametistas;
- c) Identificar variáveis relacionadas ao derrame basáltico onde ocorrem os geodos;
- d) Discutir a influência espectral de outros alvos na detecção de padrões espectrais dos *pixels*;

1.3 Desenvolvimento da dissertação

O desenvolvimento da dissertação está disposto da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentada a caracterização da área de estudo, dados de localização, geologia, aspectos climáticos, solos típicos, vegetação, além de uma descrição dos diferentes tipos de perfis geológicos da área, sua estrutura e formação.

No Capítulo 3 é apresentado um referencial teórico sobre os materiais, métodos e os principais termos relacionados ao tema da dissertação.

No Capítulo 4 são apresentados os métodos e as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do trabalho além da descrição das etapas realizadas na execução do trabalho

No Capítulo 5 são apresentados os processamentos e resultados obtidos em cada etapa do trabalho, discutidos e analisados fase-a-fase.

O Capítulo 6 contém a avaliação final sobre o trabalho juntamente com as principais conclusões sobre os processamentos realizados e os objetivos atingidos.

O Capítulo 7 apresenta o referencial bibliográfico com os autores citados nesta dissertação.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização da área

O Município de Ametista do Sul está localizado ao Norte do estado do Rio Grande do Sul, quase divisa com o Estado de Santa Catarina. Encontra-se entre as coordenadas 27° 21' 38" e 53° 10' 54", a uma altitude média de 500 m, e a uma distância de aproximadamente 490 km da Capital Porto Alegre. (Figura 2).

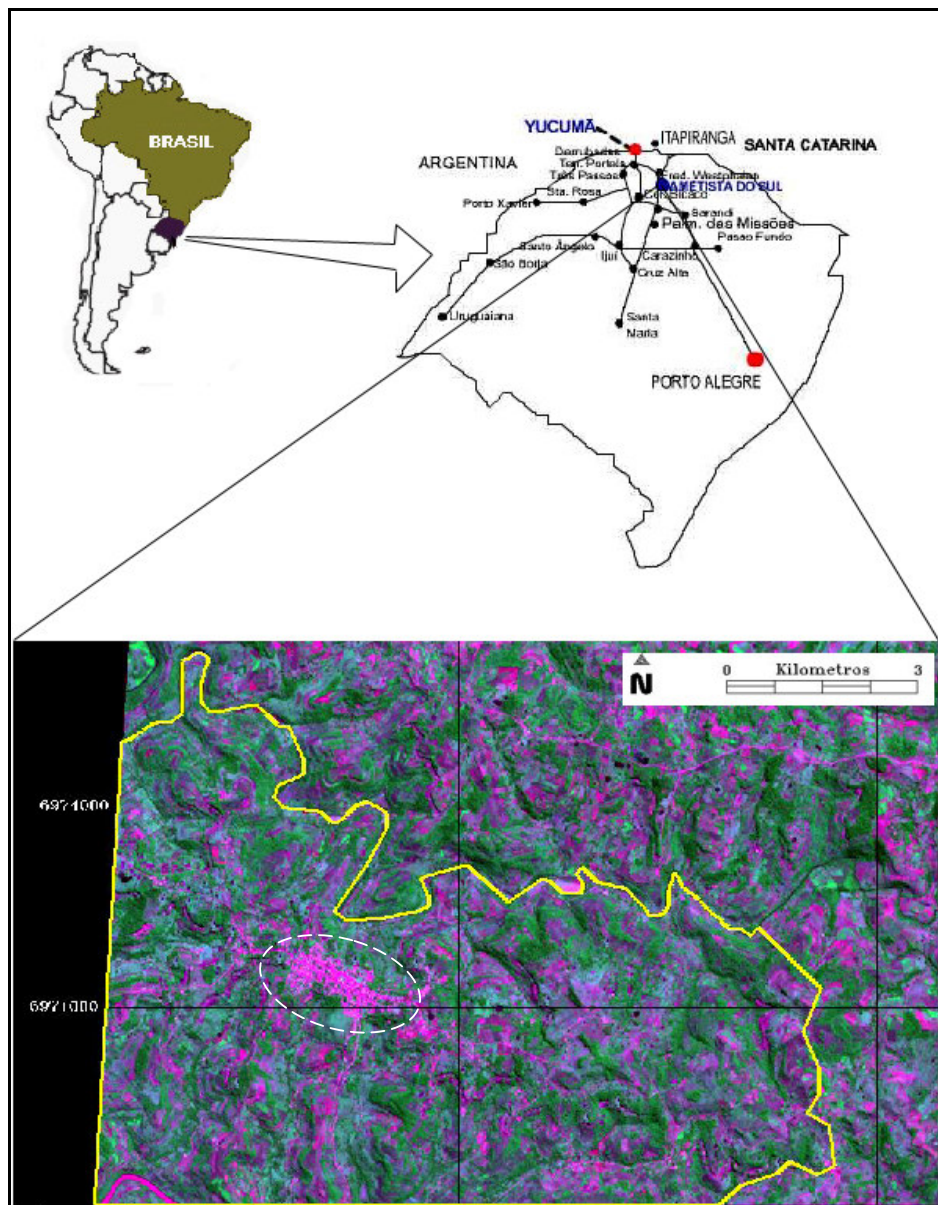


Figura 2. Localização da área de estudo (amarelo) e área urbana do município de Ametista do sul (tracejado branco) (imagem Aster R:2, G:3, B:1).

2.2 Aspectos gerais da área de estudo

2.2.1 Geomorfologia

A ametista no Rio Grande do Sul ocorre cristalizada no interior de geodos nos basaltos da Formação Serra Geral. Essas rochas, originadas por vulcanismo fissural, tiveram uma significativa contribuição na geração da nova crosta continental. A formação Serra Geral faz parte da Bacia do Paraná, uma das maiores e mais importantes bacias sedimentares brasileiras.

Os derrames cobrem 75% da bacia e ocupam uma área na ordem de 1.200.000 km², constituindo o Planalto Meridional Brasileiro (Almeida, 1986; Cordani *et al.*, 1980). Considerado como um dos mais importantes eventos vulcânicos da Terra, as rochas da Formação Serra Geral formam a maior área de rochas ígneas continuamente expostas no Brasil (Almeida, 1986), recobrendo parte dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, totalizando cerca de 734.000 km². O vulcanismo tem ainda continuidade no sul do Paraguai, norte da Argentina e região oeste do Uruguai. Numerosos diques e *sills* de diabásio aparecem intrudidos em fraturas relacionadas a essa atividade nos sedimentos paleozóicos e no embasamento pré-cambriano na região que circunda os derrames (Minioli *et al.*, 1971). Os derrames inferiores estão sobrepostos e por vezes intercalados aos arenitos eólicos da Formação Botucatu, embora localmente sejam observados contatos com sedimentos de outras formações da Baça do Paraná e inclusive com o embasamento cristalino (Petri & Fúlfaro, 1983).

As rochas vulcânicas da formação Serra Geral foram consideradas durante muito tempo como homogêneas do ponto de vista petrográfico e geoquímico. A partir das décadas de 1970 e 1980, com a obtenção de um grande volume de dados de campo e laboratório, foi possível dividir os derrames em três grandes grupos de rochas (Piccirillo & Melfi, 1998):

- _ **Basaltos toleíticos** – representam 90% do volume total de rochas;
- _ **Andesitos toleíticos** – representam 7% do volume total de rochas;
- _ **Riodacitos-riolitos** – representam 3% do volume total de rochas.

Os dois primeiros grupos têm características bastante semelhantes entre si quando observados no campo, sendo praticamente diferenciados somente em laboratório. Apresentam cores cinza escuro (quase preto) a cinza médio e cinza acastanhado, estando localizados sempre nas partes mais inferiores na seqüência dos derrames. As rochas básicas e intermediárias são afíricas a subafíricas, por vezes porfiríticas, com fenocristais (0,5-2,0 mm) e/ou microfenocristais (0,2-0,5 mm) de augita e plagioclásio (Na 52-78), e opacos (magnetita titanífera e ilmenita) e, esporadicamente, de olivinas, sempre muito alteradas. As texturas comuns são intergranular, a intersertal e a hialofítica, onde a matriz apresenta as mesmas fases cristalinas encontradas como fenocristais. Neste grupo foram identificados basaltos toleíticos, basaltos andesíticos, andesitos, latiandesitos e latitos, sempre com predomínio dos basaltos toleíticos (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1988; Melfi *et al.*, 1988).

As rochas ácidas que compõem o terceiro grupo são, em geral, facilmente distinguíveis das rochas mais básicas. Apresentam cores em tons de cinza mais claros, estruturas de fluxo comuns e diaclasamento horizontal e subhorizontal quase sempre marcante, formando placas com espessura da ordem de centímetros. Por serem mais resistentes ao intemperismo, tendem a apresentar encostas abruptas e sem cobertura vegetal, distinguindo-se das rochas mais básicas, que apresentam encostas mais suavizadas e cobertas por vegetação (Roisenberg, 1989).

Uma pesquisa geológica foi realizada por Gomes (1996), com o objetivo de individualizar e correlacionar os diversos derrames basálticos e determinar suas características estruturais, petrográficas e geoquímicas. O estudo abrange parcialmente a área objeto desta pesquisa, sendo desenvolvido a partir de 7 perfis geológicos realizados entre as cidades de Caiçara, Frederico Westphalen, Irai, Ametista do Sul e Planalto.

Nestes perfis, foram individualizados 12 derrames basálticos, do intervalo da cota de 212 m, próximo ao Rio Uruguai (nível de erosão mais baixo da área) até a cota de 580 m. Dados obtidos pela CPRM em perfurações de poços profundos para água subterrânea estimaram a presença de pelo menos mais cinco derrames abaixo do nível do Rio Uruguai, o que daria um total de 17 derrames basálticos para a região. Gomes (1996) estabeleceu uma geometria tabular para os derrames, concluindo que as lavas devem ter extrudido sobre a superfície bastante horizontalizada. Verificou ainda que o contato entre as unidades é frequentemente marcado pela presença de arenitos vermelhos, com espessuras que variam desde 10 a 30 cm, até 3 a 4 m. Também descreve que é freqüente a ocorrência de brechas constituídas por fragmentos de basalto vesicular e arenito, marcando o contato entre os derrames.

A Figura 3 apresenta um dos sete perfis geológicos estabelecidos por Gomes (1996), que vai de Irai a Frederico Westphalen. Este é o perfil mais completo de todos, pois inclui os 12 derrames identificados e o maior intervalo de altitudes dentre os perfis realizados.

A partir de estudos de estruturação interna dessas rochas vulcânicas, Gomes (1996) identificou dois tipos diferentes de derrames nessa seqüência, que foram denominados de tipo I e tipo II.

Derrames Tipo I: são derrames de menor espessura, entre 15 e 35 m, com cores pretas e cinzentas apresentando da base para o topo, um nível basal completo de rocha vesicular com pequena espessura, um nível central maciço com poucas fraturas irregulares e geralmente marcado na sua parte superior pela ocorrência de geodos, seguido de um nível vesicular de topo. São considerados do tipo I os derrames de números 2, 3, 6, 7, 8, 9 e 10 da Figura 3. Este tipo é caracterizado por apresentar a seguinte estratificação da base para o topo (Figuras 4 e 5).

1. Nível vesicular basal: pouco espesso, em média 50 cm;

- 2. Nível central:** é a porção mais espessa do derrame, podendo ter entre 10 e 25 m, dependendo da espessura total do derrame. Apresenta um padrão de fraturamento que não corresponde aos tipos “colunado” e “entablamento”, caracterizado por fraturas pouco pronunciadas, muito irregulares, que dão origem a grandes blocos com 1 a 2 m de diâmetro. No topo deste nível, é comum a presença de um nível macro vesicular interno, formado por geodos de tamanhos variados (desde centimétricos, podendo atingir alguns metros de diâmetro), preenchidos principalmente por sílica, na forma de calcedônia, ágata e ametista. Podem ocorrer calcita e zeolitas associadas;
- 3. Nível superior:** esta zona situa-se acima do nível vesicular interno e é constituída por basalto maciço, não vesicular, intensamente fraturado, com fraturas preferencialmente horizontais, com espaçamento centimétrico. Este nível pode ter entre 2 e 4 m de espessura. Nos derrames onde há mineralização, esta zona representa o nível estéril que marca o topo das galerias;
- 4. Nível vesicular de topo:** com 1 a 2 m de espessura, contém vesículas milimétricas a centimétricas, preenchidas por zeolitas, calcitas, quartzo e argilominerais, especialmente do tipo celadonita e Fe-saponita.

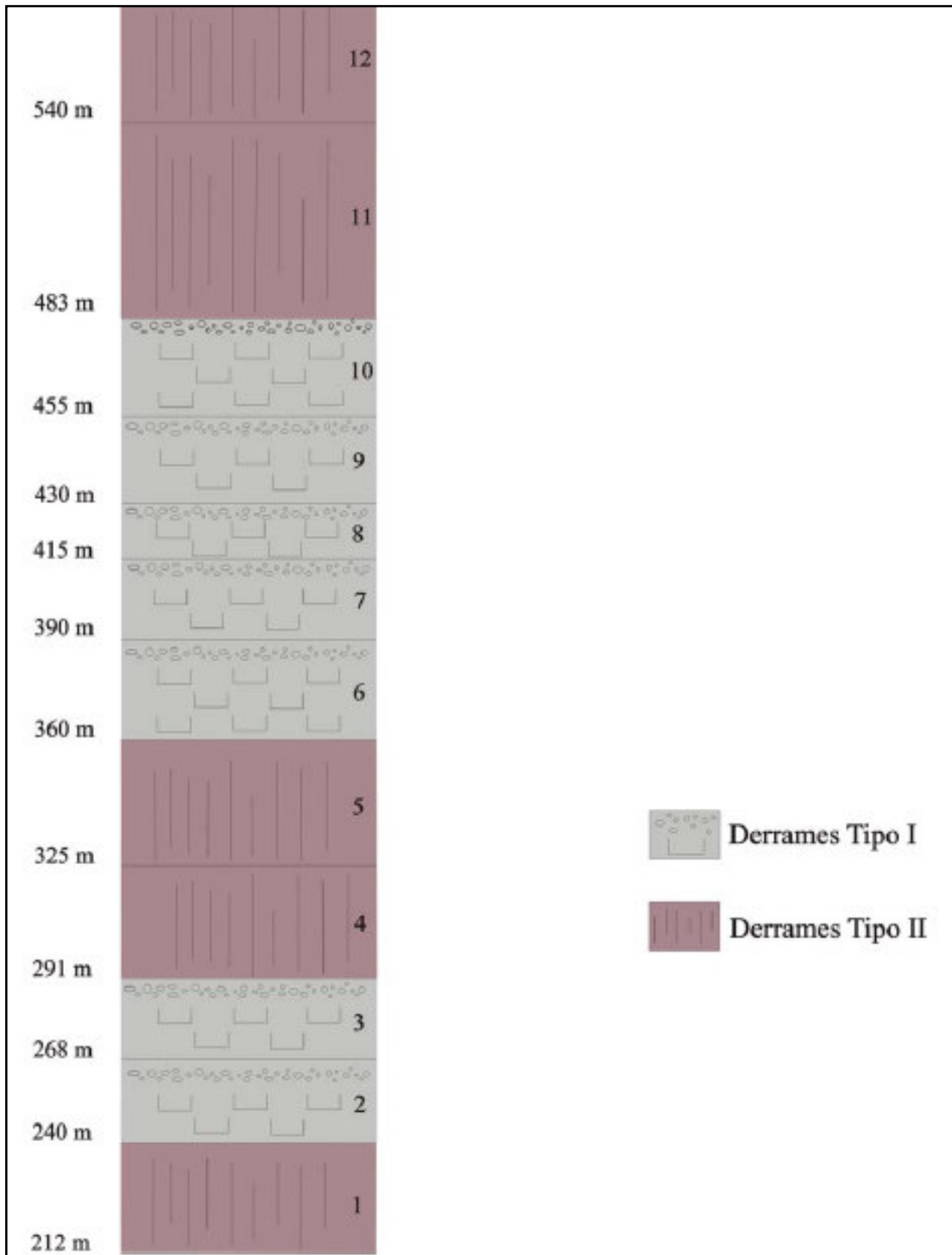


Figura 3. Perfil geológico entre Irai e Frederico Westphalen, mostrando a seqüência de derrames.
 Fonte: Juchem (1999)



Figura 4. Segunda exemplificação do derrame tipo I.

Derrames Tipo II: estes derrames caracterizam-se por apresentar as maiores espessuras encontradas na área, em geral entre 30 e 50m. São do tipo II os derrames 1, 4, 5, 11 e 12 (Figura 3). Apresentam a seguinte estratificação:

1. Nível vesicular basal: com uma espessura que varia de 40 a 100 cm. É composto na sua porção inferior por pequenas vesículas que se tornam maiores em direção ao topo deste nível. Ocorrem também vesículas do tipo “pipe”, preenchidas por quartzo e calcita, com tamanhos entre 4 e 10 cm;

2. A zona maciça intermediária é dividida em três níveis, diferenciados pelo padrão de fraturamento em:

- a. *Nível “colunado” inferior* – caracterizado por apresentar fraturas verticais e planas que dividem a rocha em prismas regulares com faces pentagonais e hexagonais com 0,5 a 1,5m de diâmetro. Constitui menos de 1/3 do derrame.
- b. *“Entablamento”* – onde aparece um fraturamento bastante irregular, gerando prismas mais estreitos (0,1 a 0,9m), com faces curvas e terminações predominantemente tetragonais. Em geral, é a parte mais espessa do derrame, podendo ter de 25 a 30 m;
- c. *Nível “colunado” superior* – semelhante ao colunado inferior, porem, mais espesso (pode ter até 10 m de espessura) e constituído por prismas maiores, de até 4 m de largura. A transição dos níveis “colunados” e “entablamento” ocorrem de forma gradual, com as fraturas tornando-se mais irregulares em direção a parte central do derrame, mostrando a sua continuidade.

3. Nível vesicular de topo: com espessura média de 10 m, é constituída por vesículas preenchidas por quartzo, zeolitas, calcita e argilominerais do grupo das ametistas.

As Figuras 6, 7 e 8, apresentam algumas regiões onde o rejeito do garimpo se encontra nas encostas próximas à mineração, no município de Ametista do Sul.

2.2.2 Caracterização dos rejeitos

O rejeito pode ser acumulado de duas maneiras. Em alguns garimpos é amontoado poucos metros em frente as galerias, formando elevações de 1 a 3 metros de altura próximos as frentes de trabalho, como pode ser visto na Figura 5. Com o passar do tempo, formam-se “corredores” de acesso às várias galerias, limitados de um lado pela encosta do morro onde estão os túneis horizontais e de outro pelos montes de rejeito. Em outros garimpos o rejeito é jogado nas encostas dos morros, como pode ser visto nas Figuras 6 e 8, o que compromete mais ainda o meio ambiente, principalmente devido ao assoreamento das drenagens. Em alguns garimpos são observados os dois processos de acumulação.



Figura 5. Rejeito extraído dos garimpos de ametista.

Os rejeitos são compostos 99% por basalto e o restantes por cristais de ametistas e outras pedras semi-preciosas. A Figura 7 mostra em detalhe este rejeito.

O basalto é uma rocha bastante escura, compacta, por vezes com cavidades, apresentando alguns cristais desenvolvidos sobre a massa compacta formada por minerais ricos em ferro e magnésio. É uma rocha básica ígnea de

grãos finos composta principalmente de feldspato plagioclásico enriquecido com cálcio e de piroxeno, também poderão estar presentes outros minerais como a olivina, magnetita e apatita. É o tipo mais comum de lava. Foi cristalizada a partir de um magma na superfície ou próximo à superfície da Terra. Como resfria rapidamente, seus minerais não crescem muito, sendo difícil observá-los a olho nú. As figuras 6 a 8 mostram os rejeitos de alguns garimpos da área em estudo.



Figura 6. Rejeitos retirados durante a extração de geodos de pedra Ametista



Figura 7. Detalhe do rejeito extraído no processo de exploração de pedras ametista.



Figura 8. Rejeitos extraídos durante a exploração de ametistas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O Sensor ASTER

O Sensor Multiespectral ASTER (Advanced Spaceborne Thermal and Reflection Radiometer) foi lançado em dezembro de 1999, a bordo do satélite Terra, como parte do programa Earth Observing System (EOS). É constituído por três subsistemas de imageamento, os quais coletam dados em várias porções do espectro eletromagnético: 3 bandas na região do VNIR (Visível-infravermelho próximo); 6 bandas na região do SWIR (infravermelho de onda curta) e 5 bandas na região do TIR (infravermelho termal). A largura da faixa imageada corresponde a 60 km². Na Tabela 1, essas informações são apresentadas mais detalhadamente.

Tabela 1. Principais características do Sensor ASTER.

ASTER			
Sub-sistema	Banda	Intervalo espectral	Resolução espacial (m)
VNIR	1	0,520 – 0,600	15
	2	0,630 – 0,690	
	3B e 3N	0,760 – 0,860	
SWIR	4	1,600 – 1,700	30
	5	2,145 – 2,185	
	6	2,185 – 2,225	
	7	2,235 – 2,285	
	8	2,295 – 2,360	
	9	2,360 – 2,430	
TIR	10	8,125 – 8,475	90
	11	8,475 – 8,825	
	12	8,925 – 9,275	
	13	10,250 – 10,950	
	14	10,950 – 11,650	

Fonte: DUCART (2004)

Diversos trabalhos relacionados à caracterização mineral já foram realizados utilizando os dados multiespectrais ASTER. Moreira Lima (2003) utilizou imagens ASTER para discriminar variações faciológicas no granito Serra Branca; Crósta *et al.* (2002) utilizou para mapear minerais de alteração

hidrotermal (caulinita-dickita, alunita e illita) na região de Los Menucos, Argentina, entre outros.

3.2 Tipos de classificação e Classificadores Multiespectrais

A classificação automática de imagens multiespectrais de Sensoriamento Remoto consiste em associar cada pixel da imagem a um "rótulo", descrevendo um objeto real (vegetação, solo, etc.). Desta forma, os níveis de cinza (NC's) associados a cada pixel, definidos pela reflectância dos materiais que compõe esse pixel, são identificados em termos de um tipo de cobertura da superfície terrestre imageada (água, tipo de vegetação, tipo de solo, tipo de rocha, etc.), denominados temas (Crosta, 1992).

Podem-se enquadrar os métodos de classificação em dois grandes grupos: classificação **não-supervisionada** e **supervisionada**.

A Classificação **não-supervisionada** é um processo onde operações numéricas são conduzidas para procurar grupamentos naturais de propriedades espectrais dos pixels (classes). A classificação não supervisionada parte do princípio de que o código computacional empregado é capaz de identificar, através de uma função de classificação, as classes dentro de um conjunto de dados.

O primeiro passo na análise não-supervisionada é a realização de uma análise de agrupamento. Através dessa análise, as nuvens de dados são identificadas no espaço de atributos. Feita essa análise, é possível estabelecer, através de uma função de classificação, quais concentrações (nuvens) devem ser tratadas com grupos separados, ou seja, o possível número de classes que pode ser identificado na imagem.

A classificação é dita **supervisionada** quando a identidade e a localização dos alvos/tipos da cobertura terrestre são conhecidas a priori, através de

trabalhos de campo, análise de fotografias aéreas, mapas, entre outros. As áreas da imagem na qual o usuário conhece a verdade terrestre são identificadas como áreas de treinamento, tendo em vista que o uso das características espectrais dessas áreas serve para treinar diferentes algoritmos classificatórios, que envolvem cálculos de estatísticas multivariada com parâmetros como média, desvio padrão, matriz de covariância, matriz de correlação, entre outros.

O procedimento de classificação supervisionada em imagens é freqüentemente utilizado no processamento de imagens orbitais obtidas por sensores multiespectrais. Esse procedimento consiste basicamente em dividir os vários pontos da imagem em grupos ou classes, de forma que os pontos de uma dada classe tenham características espectrais similares. O critério de similaridade a ser adotado definirá o tipo de classificador a ser empregado.

O método de classificação por **Distância Euclidiana** é um procedimento de classificação supervisionada, que utiliza esta distância para associar um "pixel" a uma determinada classe. Na classificação, cada "pixel" será incorporado a um agrupamento, através da análise da medida de similaridade de distância Euclidiana, que é dada por:

$$d(x,m) = (x^2 - m^2)^{1/2}$$

Onde:

x = "pixel" que está sendo testado

m = média de um agrupamento

O classificador compara a distância Euclidiana do "pixel" à média de cada agrupamento. O "pixel" será incorporado ao agrupamento que apresenta a menor distância Euclidiana. Este procedimento é repetido até que toda a imagem seja classificada.

Máxima Verossimilhança é um método estatístico de classificação que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos. Para que a classificação por máxima

verossimilhança seja precisa o suficiente, é necessário um número razoavelmente elevado de "pixels", para cada conjunto de treinamento (maior que 30).

Os conjuntos de treinamento definem o diagrama de dispersão das classes e suas distribuições de probabilidade, considerando a distribuição de probabilidade normal para cada classe do treinamento. Os limites de classificação são definidos a partir de pontos de mesma probabilidade de classificação de uma e de outra classe.

A Figura 9 apresenta o limite de aceitação de uma classificação, no ponto onde duas distribuições se cruzam. Desta forma, um "pixel" localizado na região sombreada, apesar de pertencer à classe 2, será classificado como classe 1, pelo limite de aceitação estabelecido.

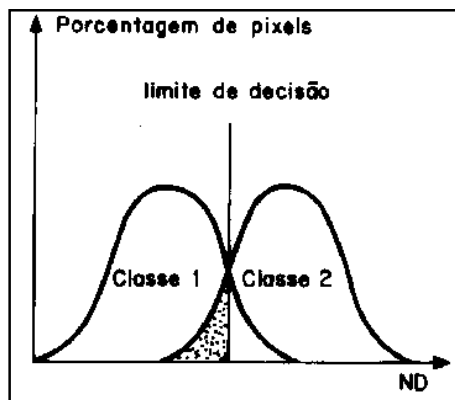


Figura 9. Histograma representando a "fronteira de decisão" entre duas classes com sobreposição nos valores de amostras.

O limiar de aceitação indica a % de "pixels" da distribuição de probabilidade de uma classe que será classificada como pertencente a esta classe. Um limite de 99%, por exemplo, engloba 99% dos "pixels", sendo que 1% será ignorado (os de menor probabilidade), compensando a possibilidade de alguns "pixels" terem sido introduzidos no treinamento por engano, nesta classe, ou estarem no limite entre duas classes. Um limiar de 100% resultará em uma imagem classificada sem rejeição, ou seja, todos os "pixels" serão classificados.

Uma matriz de classificação ideal deve apresentar os valores da diagonal principal próximos a 100%, indicando que não houve confusão entre as classes.

Contudo, esta é uma situação difícil em imagens com alvos de características espectrais semelhantes.

3.3 Espectroscopia de Imageamento

O processo de aquisição de imagens em centenas de bandas registradas e contíguas, de forma a possibilitar que para cada pixel das mesmas seja possível derivar uma curva de reflectância espectral completa, recebe as denominações de “espectroscopia de imageamento” (imaging spectrometry) e “sensoriamento hiperespectral” (hyperespectral remote sensing) (Van der Meer, 2000). O objetivo da espectroscopia de imageamento é medir quantitativamente a assinatura espectral dos componentes do sistema Terra a partir de espectros calibrados, adquiridos na forma de imagens, para uso na investigação científica e em aplicações de sensoriamento remoto (Goetz, *et al.*, 1985).

A maioria dos materiais terrestres pode ser caracterizada por feições de absorção espectral com larguras entre 0,02 e 0,04 μm . As bandas espectrais de sensores hiperespectrais são estreitas (geralmente com larguras entre 0,01 e 0,02 μm), contíguas (adjacentes e não se sobrepõem) e permitem a extração de espectros de reflectância a partir de cada pixel componente da imagem. Estes espectros podem ser extraídos e comparados com espectros medidos em campo ou em laboratório (Ducart, 2004).

Segundo Ducart (2004), existem atualmente em funcionamento vários sensores deste tipo, os quais, em sua maioria, são sensores aero-transportados, portanto, com escassa cobertura global e custos associados muito elevados. Atualmente, há apenas dois sensores hiperespectrais do tipo orbital em operação: Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS – a bordo do satélite Proba) e Hyperion Imaging Spectrometer (a bordo do satélite EO-1). Um terceiro sensor hiperespectral orbital, o Fourier Transform Hyperspectral Imager (FTHSI, a bordo do MightySat II), foi lançado em julho de 2000, não tendo chegado a atingir a órbita programada e não tendo, portanto, entrado em operação.

O sensor CHRIS somente cobre a faixa do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR), o que limita seu uso em geologia. O sensor Hyperion continua sendo, entre os dois, o mais indicado para mapeamento mineralógico devido à cobertura da faixa espectral entre o VIS e o SWIR (0,4 a 2,5 μm). Entretanto, é preciso destacar que suas imagens possuem cobertura geográfica extremamente reduzida (7,5 km de largura ao longo da órbita da plataforma EO-1).

Sensores remotos multiespectrais tradicionais, como Landsat MSS, TM e SPOT, produzem imagens de média à baixa resolução. Os espectros de reflectância de cada pixel destas imagens carecem, em muitos casos, da informação espectral essencial para a identificação dos materiais constituintes.

As técnicas utilizadas no processamento de imagens de espectroscopia de imageamento possuem diferenças com relação às técnicas utilizadas com dados multiespectrais, notadamente quanto ao seu caráter eminentemente quantitativo (Rubim, 1991, Boardman & Kruse, 1994; Crosta *et al.* 1998, Kruse *et al.*, 1999). Contudo, estas técnicas também mostram resultados satisfatórios quando aplicadas a imagens multiespectrais do Landsat TM (Almeida, 2000; Swalf, 2000; Tapia, 2002; Kruse, 1989, Kruse *et al.*, 2002a) e ASTER (Kruse *et al.*, 2002b, Azcurra *et al.*, 2003; Castro Godoy *et al.*, 2003; Marquetti *et al.*, 2003; Rowan & Mars, 2003; Souza Filho *et al.*, 2003; Markoski & Rolim, 2006).

Toda a radiação solar detectada por sensores remotos atravessa necessariamente a atmosfera da Terra. A atmosfera contém gases e partículas que provocam absorção e espalhamento da radiação. Estes efeitos afetam a intensidade e a composição espectral da radiação eletromagnética disponível para um sensor remoto, resultando na diminuição da qualidade da imagem e modificando significativamente a resposta espectral dos alvos. A absorção e o espalhamento dos gases atmosféricos são mais perceptíveis nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho e podem ser corrigidos por meio de técnicas de correção atmosféricas de imagens (Green *et al.*, 1993). Esta correção é um passo fundamental para a classificação espectral dos alvos, permitindo comparar

os valores de reflectância dos pixels das imagens com os espectros de reflectância medidos na superfície.

3.4 Classificadores Hiperespectrais

Uma dificuldade encontrada para se obter uma classificação automática mais próxima à realidade, é a de que a radiância registrada por um satélite é a soma das radiâncias de vários materiais que estão dentro do campo de visada do sensor. Esta radiação detectada é a resultante da mistura de muitos materiais diferentes adicionada à contribuição da radiância atmosférica (Shimabukuro & Smith, 1995).

O processo de detecção mineral através de dados de sensores hiperespectrais explora o fato de que muitos minerais apresentam bandas de absorção. As bandas de absorção mais comuns compreendem duas classes principais: feições de absorção amplas no visível, atribuídas à presença de minerais de ferro, e feições de absorção estreitas no infravermelho próximo, associadas à ocorrência de água, hidroxila e carbonatos. Quanto melhor for a resolução espectral disponível, mais facilmente as feições de absorção poderão ser quantitativamente caracterizadas e comparadas com dados de bibliotecas espectrais, que fazem a correlação das medidas de sensoriamento remoto com aquelas obtidas em laboratório. Tal aproximação é válida uma vez que a interação física básica em laboratório e as propriedades espectrais medidas em sensoriamento remoto são as mesmas, com as devidas considerações de escala e textura (Mustard & Sunshine, 1999).

A técnica Mapeador de Ângulo Espectral (Spectral Angle Mapper – SAM) (Kruse *et al.*, 1993) é uma ferramenta que permite o mapeamento rápido da similaridade entre o espectro de um pixel e o de um material de referência. O espectro de referência pode ser tanto de laboratório quanto de campo, de uma biblioteca espectral ou extraído da própria imagem. Este método assume que os dados da imagem foram convertidos para reflectância de superfície. O algoritmo

determina a similaridade espectral entre dois espectros através do cálculo do ângulo formado entre eles, tratando-os como vetores em um espaço de dimensionalidade correspondente ao número de bandas (nb).

Uma representação simplificada deste processo pode ser visualizada na Figura 10. Considerando um espectro de referência e outro de teste, a partir de das bandas representadas bidimensionalmente como dois pontos, quanto menor for o ângulo determinado entre os dois vetores (espectros de reflectância), maior será sua similaridade. O algoritmo SAM generaliza essa interpretação geométrica para o espaço nb-dimensional.

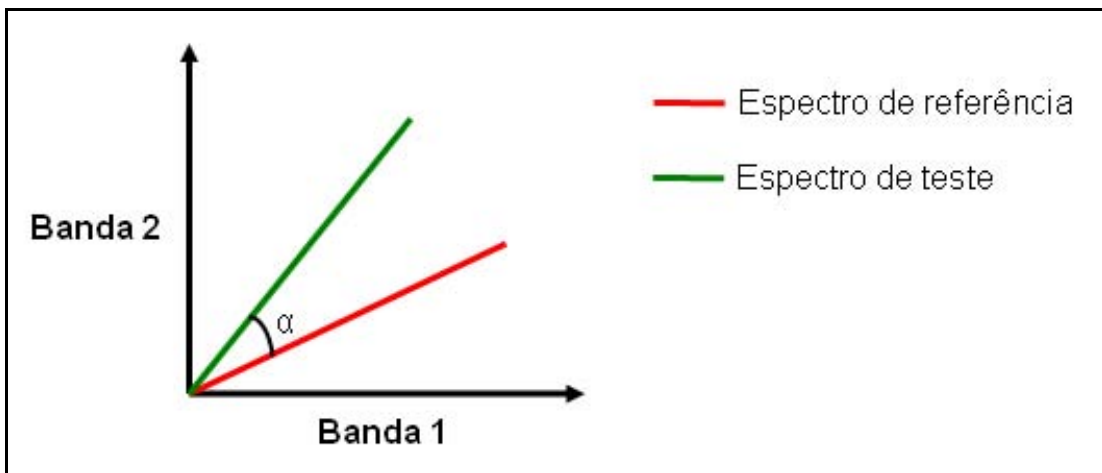


Figura 10. Representação gráfica da Técnica SAM.
Fonte: MOREIRA LIMA (2004)

A técnica SAM determina a similaridade de um espectro teste t para um espectro de referência r , de acordo com Kruse *et al.* (1993), pela aplicação da seguinte equação:

$$\cos^{-1} \left(\frac{\vec{t} \cdot \vec{r}}{\|\vec{t}\| \cdot \|\vec{r}\|} \right);$$

Que também pode ser escrita como:

$$\cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{1/2}} \right);$$

Esta medida de similaridade é insensível aos fatores de ganho porque o ângulo entre dois vetores é invariante em relação aos comprimentos dos vetores. Espectros de laboratório podem ser diretamente comparados aos espectros de reflectância de superfície de pixels, os quais inerentemente apresentam um fator de ganho desconhecido relacionado a efeitos de iluminação devidos à topografia (Kruse *et al.* 1993). Como resultado, obtém-se uma imagem classificada, mostrando o melhor ajuste para cada pixel, sujeito a um limiar especificado pelo usuário (RSI, 2003). Adicionalmente, são fornecidas imagens “*rule*” que mostram a distância angular (em radianos) entre cada espectro da imagem e cada espectro de referência. Os pixels escuros na imagem “*rule*” representam ângulos espectrais de valor baixo e, portanto, mais similares aos espectros de “*endmembers*”. Para uma melhor visualização, estas imagens são invertidas para que os melhores ajustes (representados pelos menores ângulos) apareçam em tom claro.

As Figura 11 e 12 ilustram, respectivamente, para exemplificação, espectros da resposta espectral representada em contadores digitais para a classe solo exposto e água, respectivamente, extraídas das 9 bandas ASTER utilizadas neste trabalho.

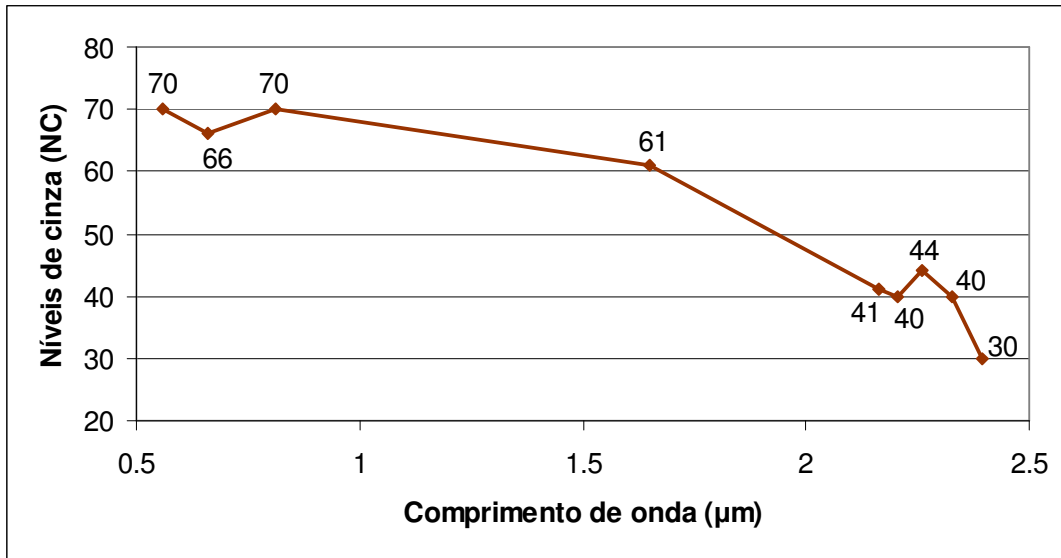


Figura 11. Curva de resposta espectral para a classe solo exposto extraída da imagem ASTER da área de estudo.

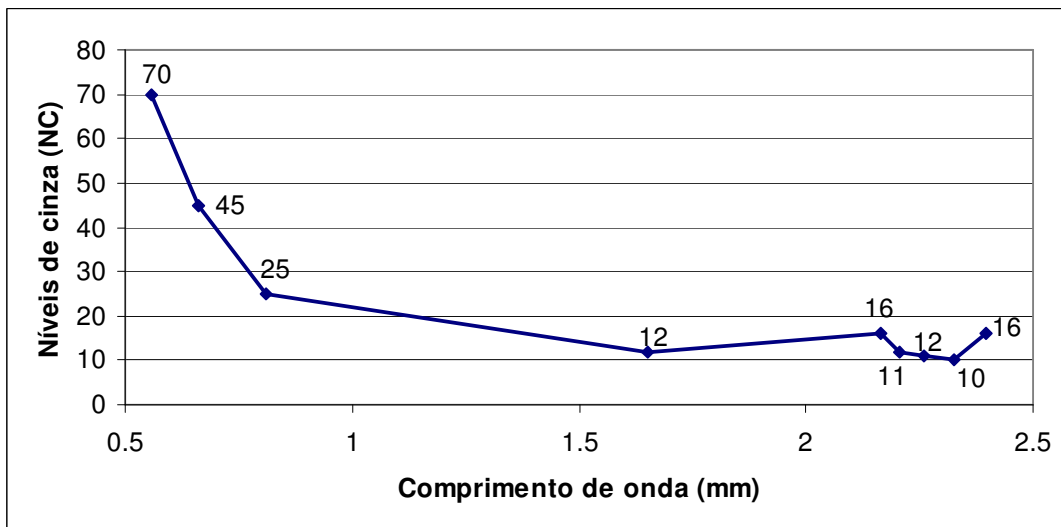


Figura 12. Curva de resposta espectral para a classe solo exposto extraída da imagem ASTER da área de estudo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais, os programas computacionais e os procedimentos de trabalho adotados para implementar os objetivos do presente projeto.

4.1 Materiais

Foram utilizados dados cartográficos, imagem de satélite do sensor ASTER e pontos de GPS. Os dados cartográficos foram os de topografia, vias de acesso e localização de cidades, visualizados na carta topográfica de Ametista do Sul na escala 1:50.000 e na projeção UTM.

A imagem ASTER utilizada foi a:

_ AST_L1B_003_03052001135238_01022002065518 datada em 03 de maio de 2001. Foram utilizadas as bandas 1 a 3 do VNIR (*Visible and Near-infrared* – 400 a 860 nm) e as bandas 4 a 9 do *Shortwave Infrared* (SWIR – 1000 a 2500 nm).

Os dados de GPS utilizados compreenderam 7 pontos de controle e 16 pontos de rejeito de garimpos, obtidos em trabalho de campo descritos nas Tabelas 2 e 3 respectivamente.

4.2 Programas

Os seguintes programas, disponíveis do CEP SRM/UFRGS foram utilizados no processamento das informações:

_ ENVI 4.2 (RSI): programa de processamento de imagens utilizado para as etapas correção geométrica das imagens, geração do DEM (Digital Elevation Model), classificações utilizando os algoritmos de Distância Mínima Euclidiana e

Máximo Verossimilhança, além da técnica SAM, utilizado para a geração das imagens com os índices de purezas dos pixels.

_ TrackMaker: programa para navegação em GPS. Foi utilizado na etapa de campo para a visualização dos pontos visitados em tempo real.

_ Photoshop 7.0: programa de edição de imagens. Utilizado para a edição final dos mapas e figuras.

4.3. Métodos

Neste tópico, são apresentadas as etapas efetuadas na execução do trabalho:

- 1) Levantamento bibliográfico sobre a geologia da área de estudo, características dos garimpos e aspectos gerais relativos ao ambiente;
- 2) Levantamento bibliográfico sobre os demais termos correlacionados (sobre os materiais e métodos);
- 3) Análise visual das imagens ASTER referentes à área de estudo (identificação dos alvos, feições, características dos alvos);
- 4) Trabalho de campo, com a coleta de pontos e fotos de garimpos no município de Ametista do Sul;
- 5) Processamento computacional das imagens, etapa esta descrita abaixo:

1) Inicialmente, a imagem ASTER foi classificada, sem correção geométrica, a fim de serem mantidos os valores dos pixels, utilizando dois classificadores, para o confronto dos resultados e identificação do melhor resultado. Além disso, se poderia testar se somente com este tipo de classificação é possível ter bons resultados para mapeamento de rejeitos de garimpo. Os algoritmos de classificação utilizados foram Mínima Distância Euclidiana e Máxima Verossimilhança, dois dos algoritmos mais utilizados em classificação de imagens.

2) Correção geométrica na imagem, utilizando 7 pontos de controle, adquiridos na etapa de trabalho de campo. A descrição dos pontos de controle utilizados é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Coordenadas dos pontos de controle utilizados para a correção geométrica.

ID	Coordenada UTM	Datum	Altitude (m)
PC01	x:280448 y:6971892	Córrego Alegre	427
PC02	x:281361 y:6971815	Córrego Alegre	427
PC03	x:282831 y:6972179	Córrego Alegre	467
PC04	x:283110 y:6972157	Córrego Alegre	475
PC05	x:284520 y:6971387	Córrego Alegre	490
PC06	x:285122 y:6966775	Córrego Alegre	273
PC07	x:288478 y:6968210	Córrego Alegre	496
			Média: 436,43 m

Para o processo de correção, foi utilizada a interpolação por vizinho mais próximo. A imagem corrigida geometricamente foi utilizada para a localização real e precisa dos rejeitos de garimpos.

3) Determinação do grau de similaridade entre pixels de referência e a imagem ASTER através da técnica SAM;

Para este trabalho, a técnica SAM foi aplicada para nove bandas do sensor ASTER (3-VNIR + 6-SWIR) com valor de ângulo de 0.1 radianos.

A curva da resposta espectral representada em contadores digitais dos rejeitos de garimpos utilizada foi extraída diretamente da imagem ASTER composta pelas nove bandas do VNIR e SWIR. Os pontos de rejeitos coletados a campo foram sobrepostos a imagem ASTER e os valores pixels correspondentes foram observados. A média destes valores para as nove bandas gerou o espectro da resposta espectral da classe “rejeitos de garimpos”, a qual foi utilizada no processamento.

Como resultado, obteve-se uma imagem classificada e uma imagem “rule”. A imagem classificada foi desconsiderada. A imagem “rule” foi reclassificada,

deixando apenas os pixels com menores valores de ângulos, ou seja, com maior similaridade espectral.

5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1 Coleta de pontos de garimpos

A Figura 13 apresenta a área de estudo, em uma composição colorida R(2) G(3) B(1) com a disposição dos pontos de garimpos coletados via GPS. Foi coletado um total de 16 pontos, os quais são também descritos na Tabela 3. Os pontos apresentaram altitudes que variam de 423 a 450 m. A Figura 14 ilustra alguns dos pontos de garimpos da Figura 13, dispostos em uma modelo digital de elevação (MDE) tridimensional do terreno.

Segundo esses dados, a faixa do derrame basáltico onde são encontradas ametistas está aproximadamente entre 423 e 450 m de altitude. Isto quer dizer que as áreas a serem exploradas, em sua grande maioria, devem estar dentro desta faixa. Este dado é importante para evitar a degradação do meio ambiente em níveis estéreis (Figura 15), como o acúmulo de rejeitos e a sobreposição de encostas e matas com os mesmos.

Tabela 3. Coordenadas UTM dos garimpos onde foram coletados os pontos.

ID	Coordenadas (UTM)	Datum/Fuso	Altitude do ponto (m)
G01	X:285235 y:6971371	Córrego Alegre/22	437
G02	X:284615 y:6971556	Córrego Alegre/22	442
G03	X:284693 y:6971477	Córrego Alegre/22	452
G04	X:285125 y:6966778	Córrego Alegre/22	450
G05	X:286201 y:6966025	Córrego Alegre/22	429
G06	X:286194 y:6965969	Córrego Alegre/22	420
G07	X:287150 y:6967949	Córrego Alegre/22	450
G08	X:287630 y:6969112	Córrego Alegre/22	437
G09	X:287811 y:6971726	Córrego Alegre/22	440
G10	X:282672 y:6970626	Córrego Alegre/22	423
G11	X:286833 y:6970936	Córrego Alegre/22	440
G12	X:282276 y:6972106	Córrego Alegre/22	443
G13	X:281782 y:6972053	Córrego Alegre/22	430
G14	X:283664 y:6971448	Córrego Alegre/22	428
G15	X:283204 y:6971954	Córrego Alegre/22	425
G16	X:285109 y:6970378	Córrego Alegre/22	430
		Média	436

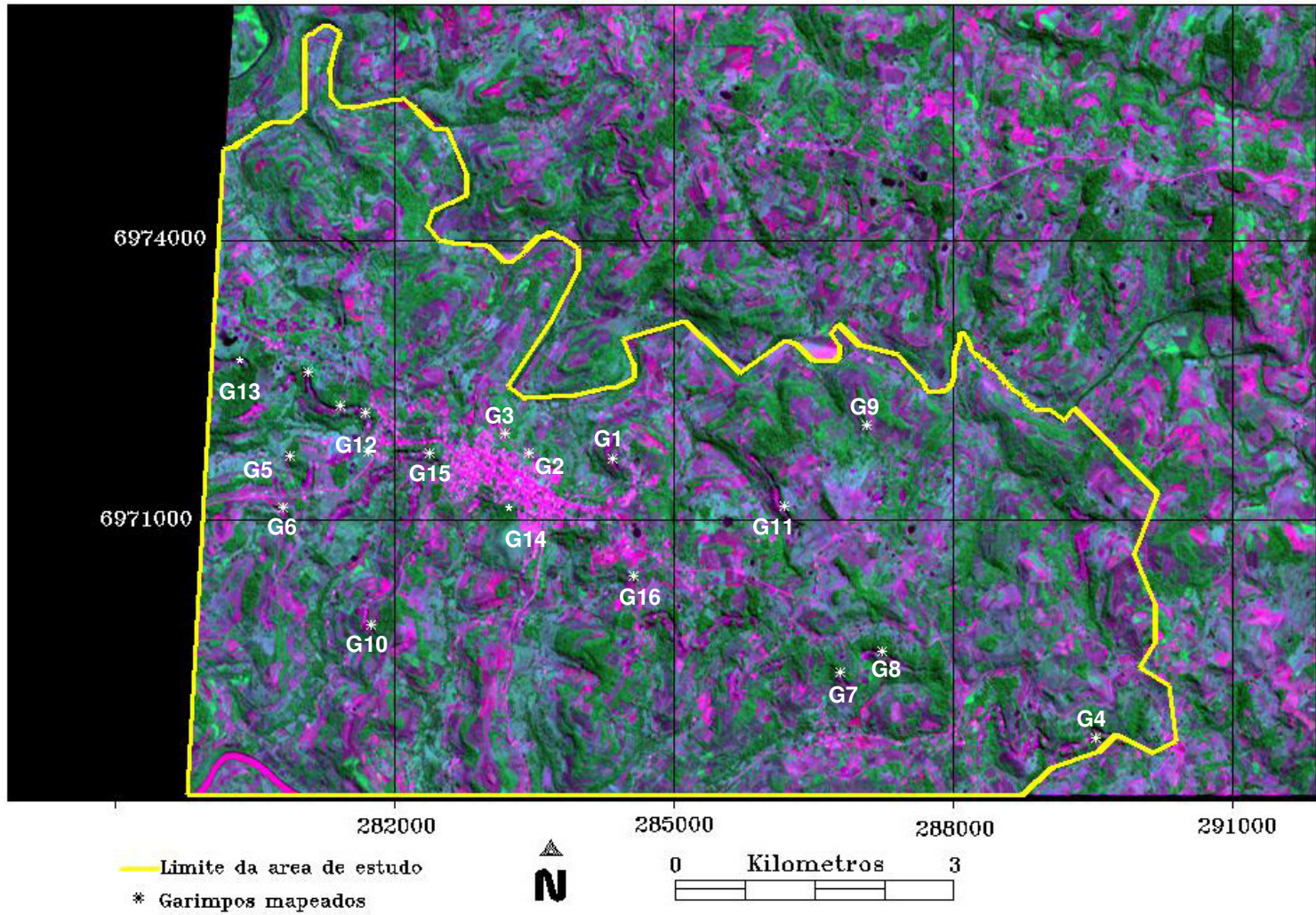


Figura 13. Localização dos 16 pontos de rejeitos coletados no município de Ametista do sul)

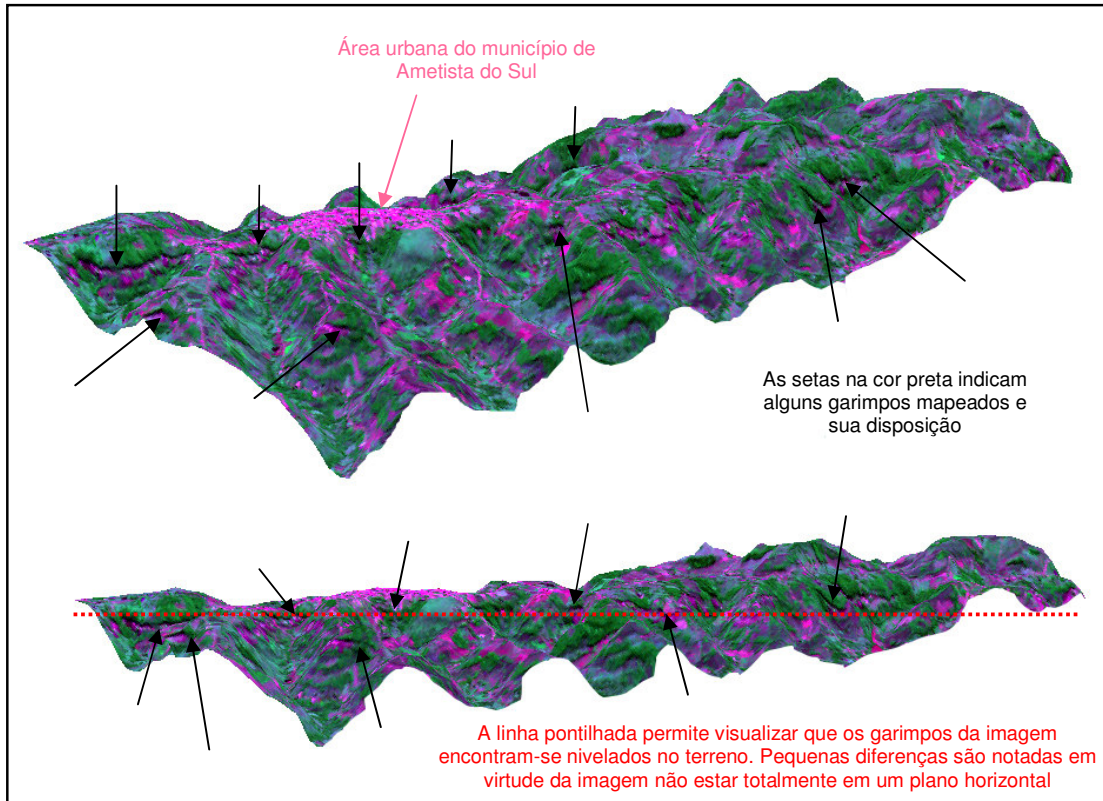


Figura 14. Mapa digital de elevação em 3 dimensões contendo os pontos de rejeitos coletados em campo.



Figura 15. Exemplo de explorações realizadas em cotas erradas do derrame basáltico. Dos 2 níveis abertos, apenas o inferior possui mineralização.

5.2 Georreferenciamento da Imagem ASTER

A correção geométrica das imagens foi realizada utilizando-se 7 pontos de controle (Tabela 2) coletados em saída de campo. Foi utilizado o método de interpolação por vizinho mais próximo, e obtendo-se precisão de correção inferior a 1 (um) pixel.

5.3 Classificações da Imagem ASTER

Inicialmente foram geradas classificações com os seguintes usos: **mata**, **água**, 2 tipos de solo exposto: **solo escuro**, **solo claro**, **campos (pastagens)**, **agricultura**, **sombra** e o alvo principal, os **rejeitos de garimpo/basalto**. A Tabela 4 apresenta uma descrição destes alvos, com suas principais características.

Tabela 4. Descrição das amostras de classes utilizadas na classificação por Distância Mínima Euclidiana e Máxima Verossimilhança

Uso	Número de pontos	Descrição
Mata	691	Áreas com mata nativa ou reflorestamento de grande porte
Solo exposto claro	334	Áreas com solo exposto de coloração rosada
Solo exposto escuro	362	Áreas com solo exposto de coloração violeta escuro
Água	239	Rios de pequena e média largura e lagoas
Campos	306	Áreas destinadas principalmente a pastagens
Área cultivada	340	Áreas de agricultura, culturas anuais
Rejeito de garimpos/basalto	53	Basalto retirado das cavas durante o processo de extração de pedras semi-preciosas
Sombra	124	Áreas sombreadas por nuvens ou encostas de montanhas ou morros
Total	2449	

Optou-se por classificar 7 classes ao invés de apenas o basalto (rejeito de garimpos), para que os classificadores tivessem o menor número de erros possível, tanto por exclusão, como por inclusão de classes. Mas para efeitos de discussão dos resultados, apenas a classe “rejeitos de garimpos” e “sombra” (classe diretamente relacionada a classe principal) foram levados em consideração.

5.3.1 Histogramas das amostras

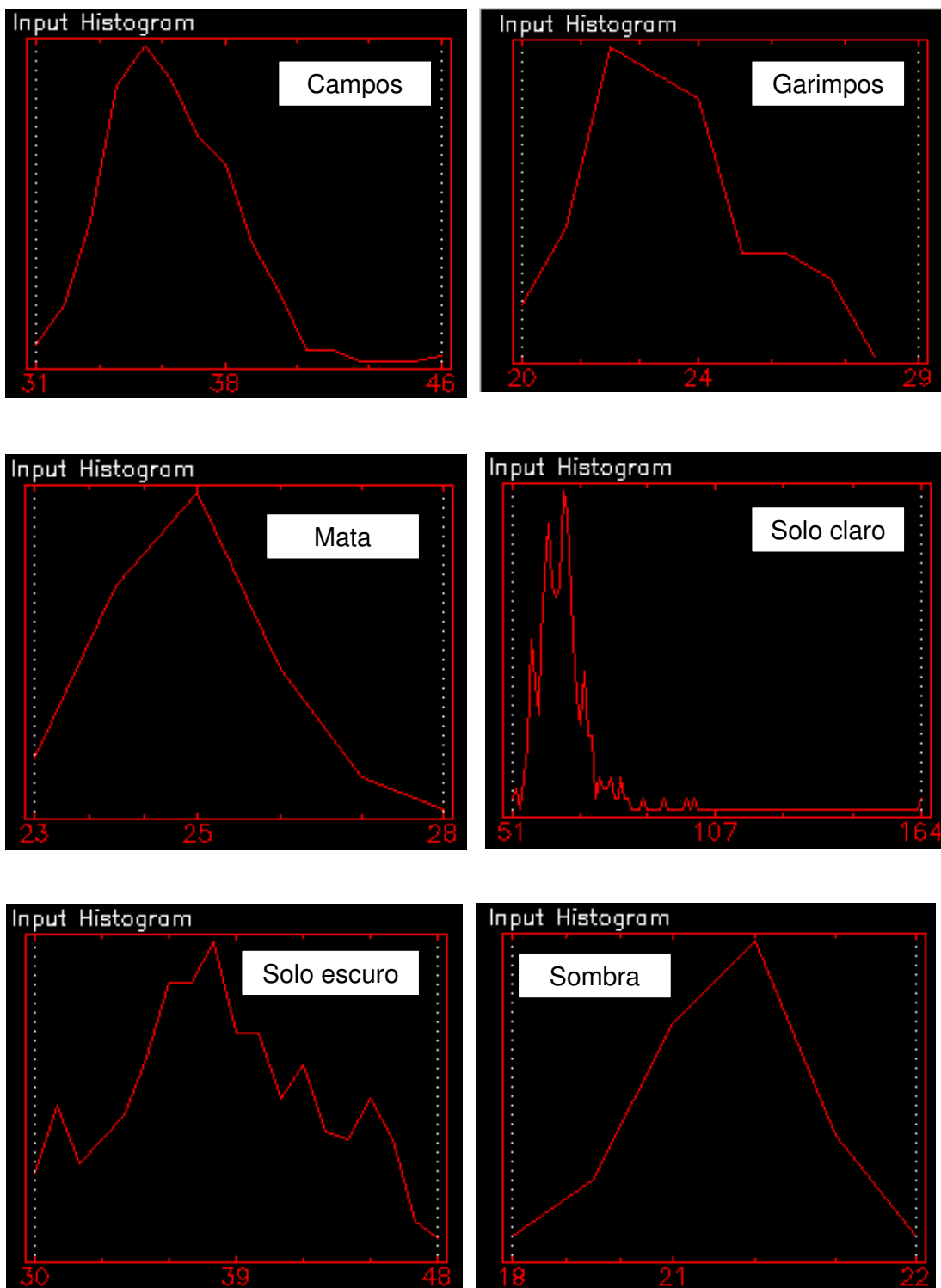
Uma avaliação estatística do comportamento das amostras de classes foi realizada através da construção de histogramas para a inferência sobre possíveis resultados das classificações.

Para que a classificação, tanto por distância mínima euclidiana quanto por máximo verossimilhança seja precisa é necessário um número razoavelmente elevado de pixels para cada conjunto de amostras de treinamento ou interesse, número esse preferencialmente acima de uma centena (Campbell, 1987).

Esse número permite uma base segura para tratamento estatístico e por conter um grande número de pixels, não é possível representá-los graficamente de maneira individualizada. Utiliza-se, nesse caso, isolinhas ou curvas de contorno no espaço de atributos, representando a função densidade de probabilidade de pixels correspondentes às amostras de treinamento para cada classe.

Essas probabilidades representam uma ferramenta de classificação poderosa e flexível, através da qual é possível escolher, por exemplo, a classificação de apenas os pixels conhecidos que estão bastante próximos à média de uma classe. Por outro lado, pode-se julgar necessário classificar os pixels desconhecidos que se situam a qualquer distância da média, dentro da área definida pelo conjunto de treinamento. Nesse caso, escolher-se-ia, como limite de decisão, o contorno que engloba, por exemplo, 99% dos pixels das amostras de treinamento. Descartando-se os restantes 1%, pode-se compensar, por exemplo, a possibilidade de que alguns dos pixels da área de treinamento sejam incluídos por engano, como citado anteriormente, podendo representar ruído ou pixel situado no limite entre dois tipos de cobertura. Usando esses conceitos, podem-se classificar todos os pixels de uma imagem como pertencentes às classes pré-definidas.

Para observarmos o comportamento geral das amostras em relação aos valores dos pixels, gerou-se para cada amostra um histograma, com base na banda 2 do ASTER, que são apresentados a seguir, na Figura 16.



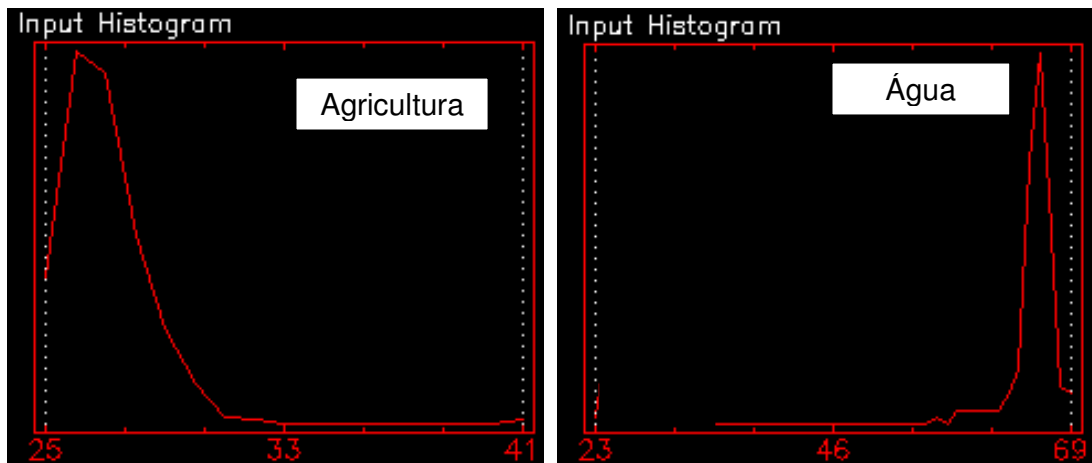


Figura 16. Histogramas das amostras de classes retiradas da imagem ASTER (banda 2).

A análise destes histogramas nos permite fazer inferências sobre os resultados das classificações. As classes apresentam isolinhas que se aproximam da Distribuição Normal. Classificadores como o de máxima verossimilhança tende a apresentar bons resultados na classificação quando estas amostras apresentam este comportamento, pois o mesmo foi desenvolvido com base nesta distribuição. As amostras apresentam um pico central, com a distribuição simétrica nas bordas, com exceção para as duas classes de solo exposto “escuro” e “claro”. Estas classes possuem uma forma mais irregular devido a dificuldade na coleta de amostras. Ambas são de fácil confusão visual, justificando a forma apresentada nos histogramas.

Em termos de classificação, tendem a apresentar um maior número de erros com relação às outras classes, mas como ambas são classes de solo exposto, podendo-se uni-las para uma análise final, este erro não representa um risco maior aos nossos resultados.

5.3.2. Caracterização visual das amostras de treinamento

Nas figuras 17 e 18 são caracterizados e apresentados exemplos de amostras dos alvos classificados, enfocando principalmente os rejeitos de garimpos.

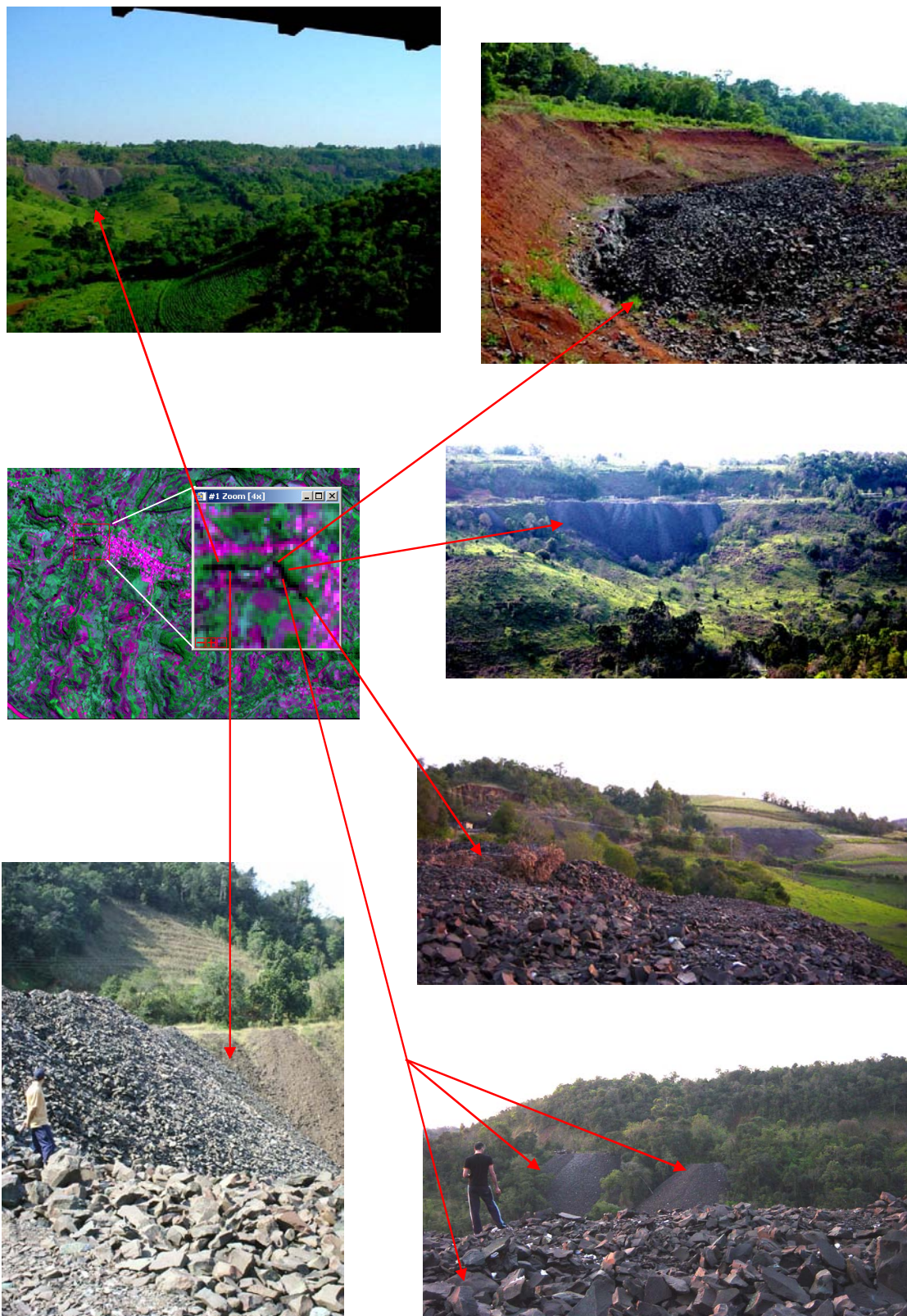


Figura 17. Fotos dos rejeitos retirados dos garimpos.

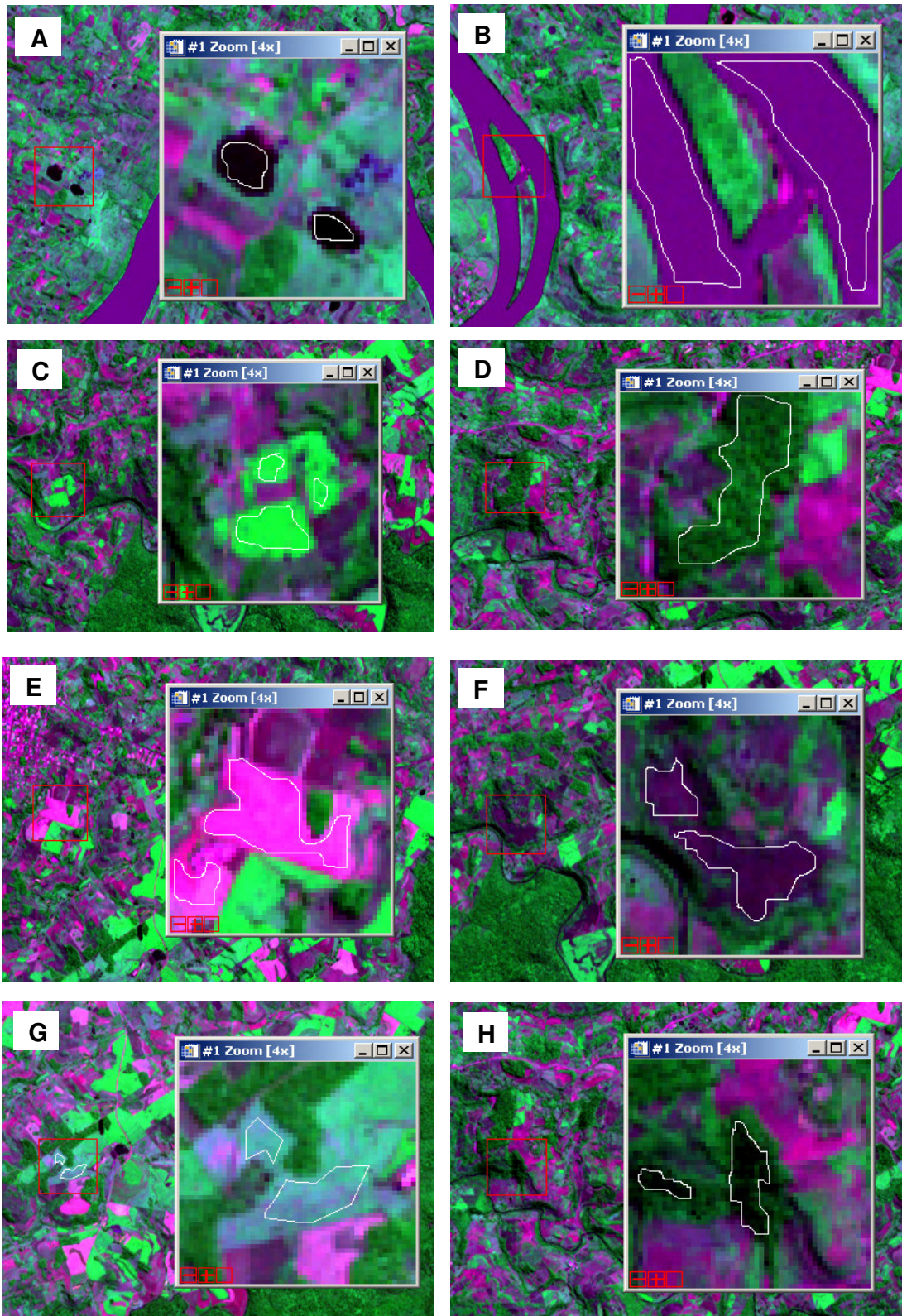


Figura 18. Exemplos de amostras utilizadas nas classificações por Máxima Verossimilhança e Distância Mínima Euclidiana. (A) Água de lagoas; (B) Água de rios; (C) Agricultura; (D) Mata; (E) Solo exposto claro; (F) Solo Exposto escuro; (G) Campos; (H) Sombra;

Como visualizado nas Figuras 17 e 18, a presença de vegetação próxima aos rejeitos de garimpos é sempre grande, principalmente a presença de mata nativa, o que dificulta a classificação, em grande parte ocasionada por áreas sombreadas (classe sombra, Figura 18), que na região do visível, é facilmente confundida com os rejeitos dos garimpos (Figura 17).

5.3.3. Resultados obtidos nas classificações

A imagem foi classificada em 8 usos: “mata”, “solo exposto tipo claro”, “solo exposto tipo escuro”, “água”, “agricultura”, “campos”, “sombra” e “rejeitos”. A descrição das classes pode ser encontrada na Tabela 4.

O problema maior na utilização destes classificadores ocorre com relação às estas duas últimas classes de interesse, pois em alguns pontos não há diferença espectral sensível à classificação. Esta dificuldade já se apresenta na análise visual das imagens, pois a maioria dos garimpos situa-se em morros ou em áreas de mata nativa.

Dos 16 pontos de garimpos mapeados via GPS, 14 foram classificados corretamente pelo classificador de Mínima Distância Euclidiana (os pontos G2 e G3 – Figura 9 – não foram classificados), e pelo classificador de máxima verossimilhança, 15 pontos (o ponto G3 não foi classificado). Estes dois pontos não foram classificados, provavelmente por estarem localizados em garimpos muito pequenos, onde os rejeitos retirados dos mesmos eram em pequena quantidade. Na imagem ASTER constituem poucos pixels (um ou menos ainda), sendo fortemente influenciados pela reflectância de outros alvos, como por exemplo, solo exposto ou sombra. Além desses 16 pontos, outras áreas foram classificadas como rejeito de garimpo/basalto. Isso se deve ao fato de que:

- 1) Presença de áreas de garimpo ainda não registradas;

- 2) Em algumas áreas poderia haver a presença de basalto exposto ou outro material com resposta espectral semelhante;
- 3) Áreas com sombreamento classificadas como áreas de garimpos (principal erro do classificador), causadas pela semelhança espectral, principalmente na região do visível. Além disso, observa-se um tamanho reduzido das áreas-alvo, em certos locais, menores que um pixel, o que dificulta o reconhecimento e a classificação.

As Figuras 19 e 20 apresentam as classificações de distância mínima euclidiana e máxima verossimilhança realizadas na imagem ASTER, respectivamente. Como citado anteriormente, foi utilizado um valor limiar de 5% para as mesmas. Como podemos visualizar nas Figuras, o resultado por distância mínima euclidiana classificou um número maior de pixels para todas as classes, em comparação com a classificação por máxima verossimilhança. O Erro apresentado pelo classificador também foi maior, principalmente em virtude desta maior abrangência de pixels. A classificação por máxima verossimilhança obteve um resultado mais objetivo, apresentando uma classificação mais “pura”, eliminando em grande parte os erros de confusão entre a classe “rejeitos” e “sombra”, mesmo assim, em algumas áreas, este erro permanece.

A Figura 21 apresenta as duas classificações realizadas, onde são exemplificadas áreas de garimpos, que foram corretamente mapeadas como rejeito de basalto e áreas onde houve erro na classificação, ou seja, áreas que deveriam ser mapeadas como “sombra” e foram mapeadas como “rejeito”. Alguns pixels das áreas de sombra foram mapeados corretamente como sombra, mas a grande maioria foi classificada como rejeito de rejeito.

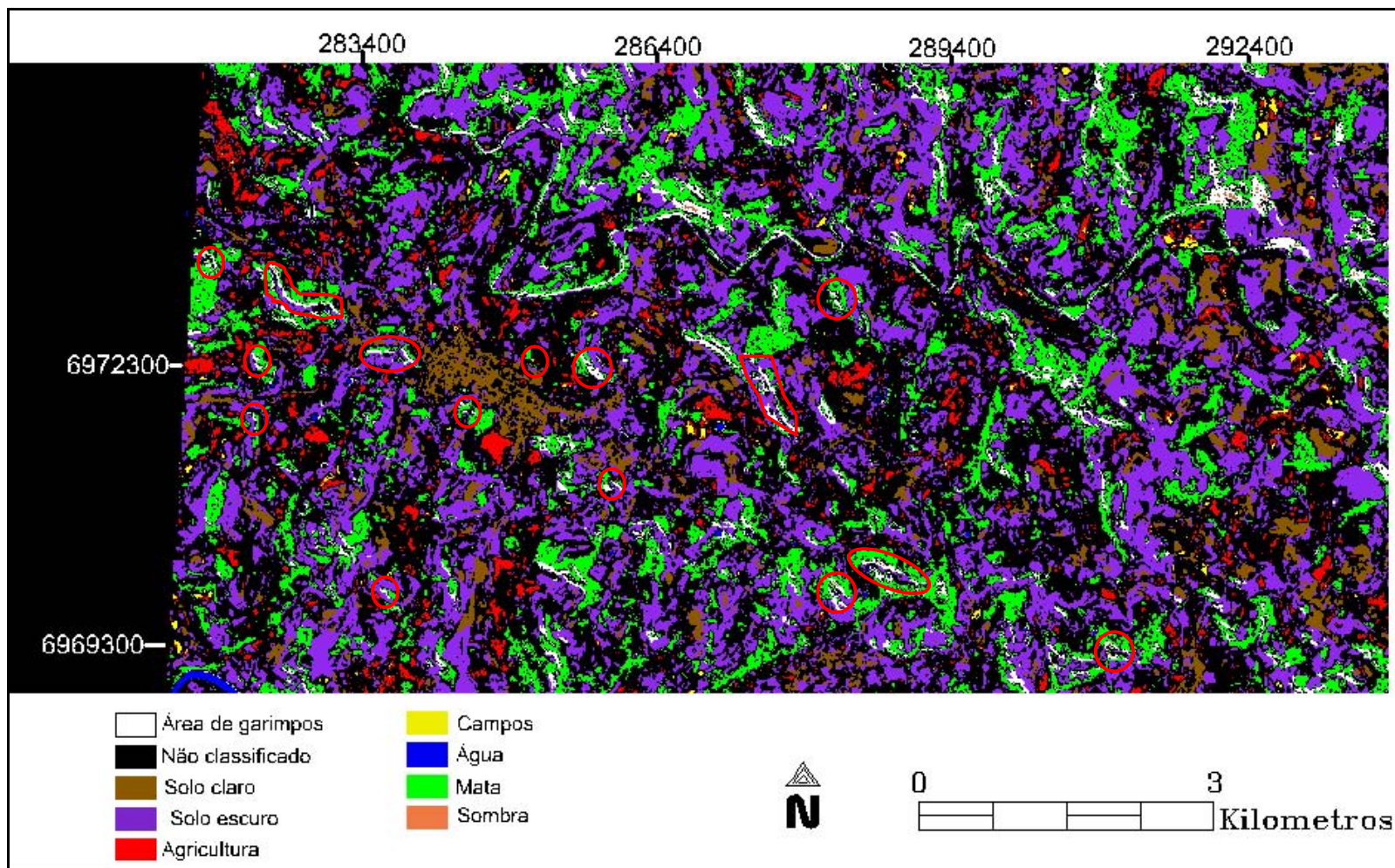


Figura 19. Classificação pelo método de Distância Mínima Euclidiana.

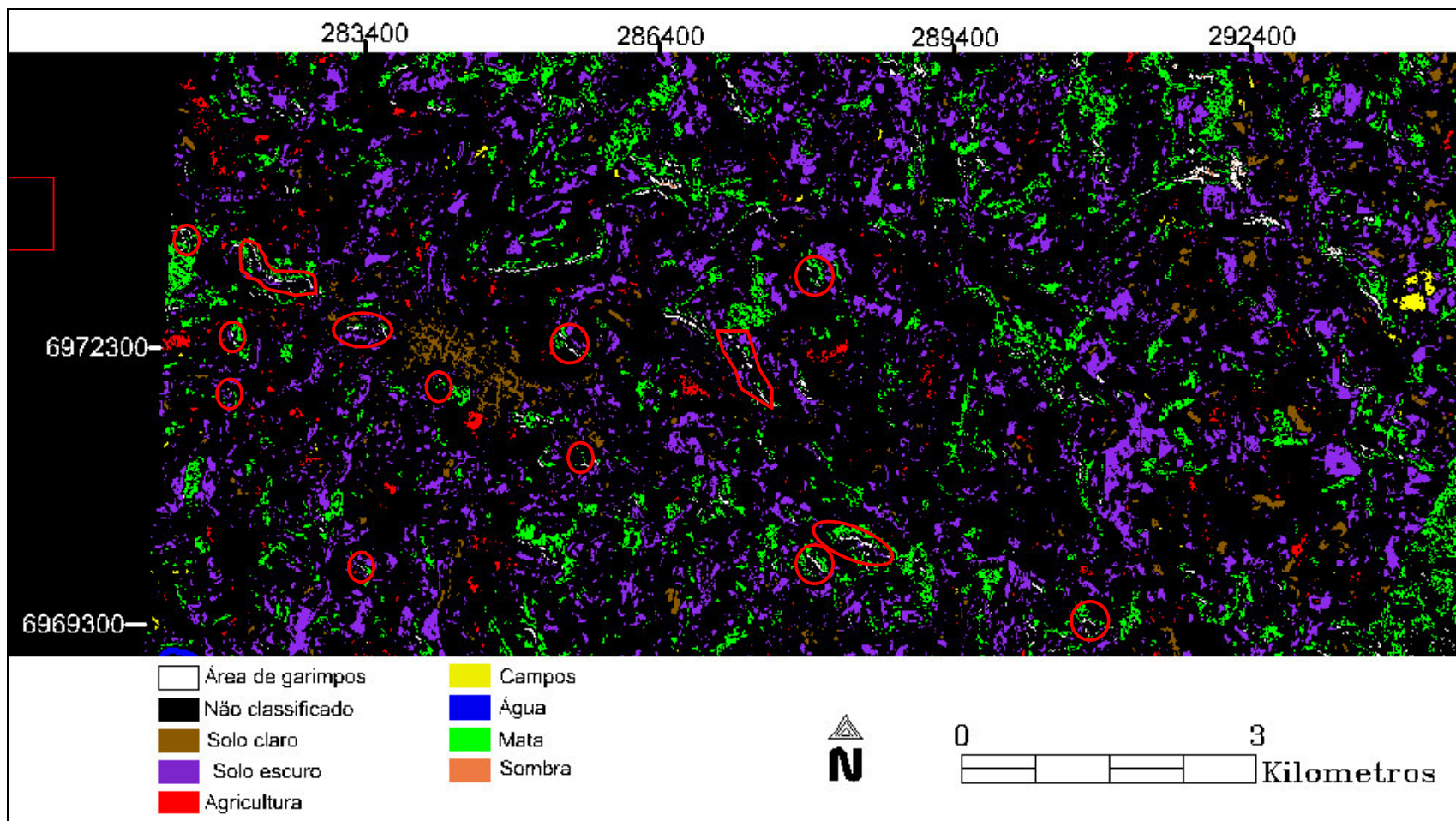


Figura 20. Classificação pelo método de Máxima Verossimilhança.

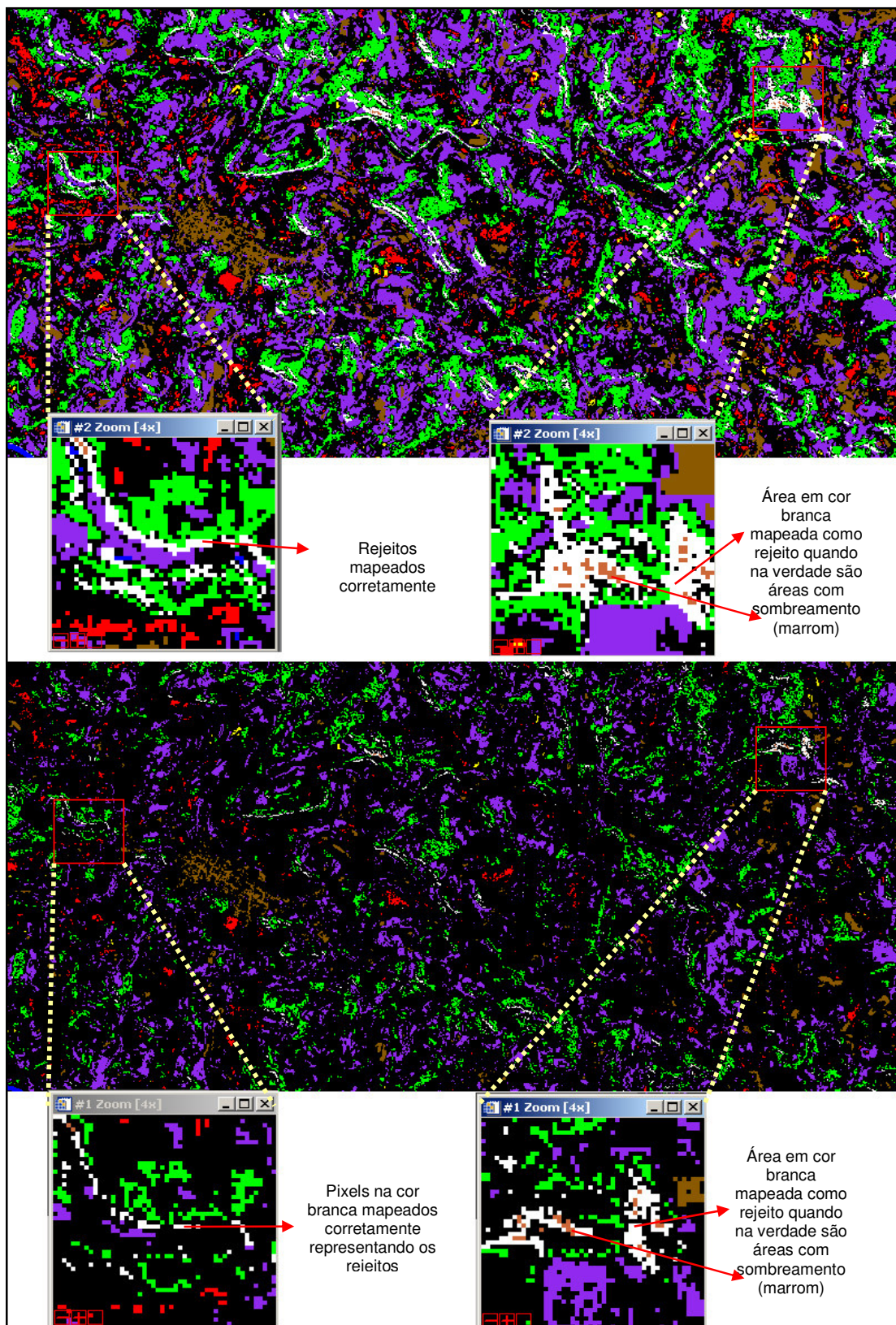


Figura 21. Comparação entre as duas classificações: Distância Mínima Euclidiana e Máxima Verossimilhança respectivamente.

5.4 Aplicação da Técnica SAM na Imagem ASTER

Para a aplicação da técnica SAM, foi utilizada a curva de resposta espectral representada em contadores digitais do rejeito, extraída diretamente da imagem ÁSTER, o qual pode ser visualizado na Figura 22.

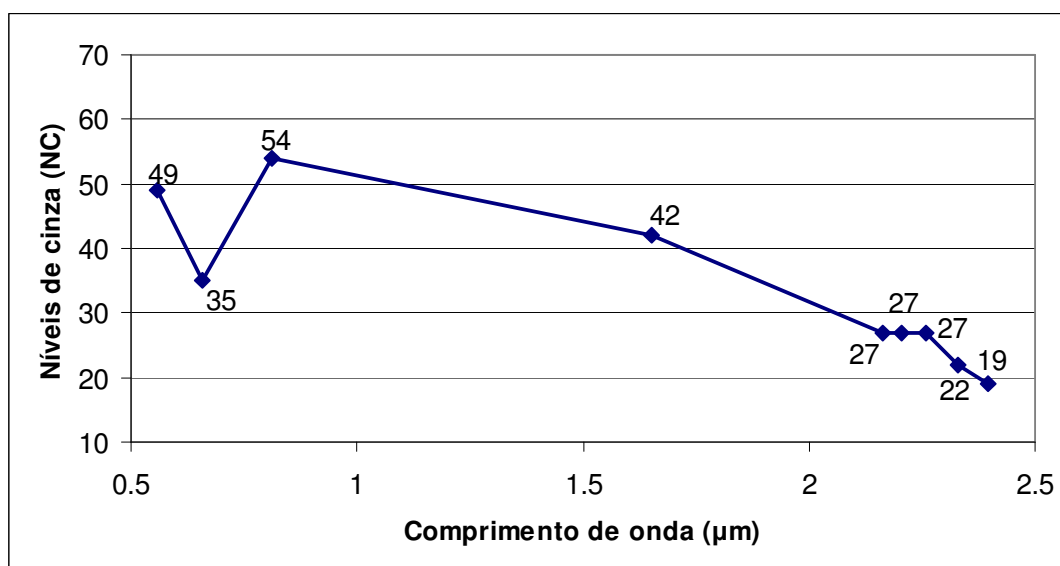


Figura 22. Curva de resposta espectral representada em contadores digitais do rejeito extraída das bandas do ASTER.

Notamos que o rejeito possui uma resposta maior na banda 3, a qual corresponde ao comprimento de onda do infravermelho próximo e nas próximas bandas do SWIR. Já as próximas bandas do infravermelho médio apresentam uma absorção maior que é característica dos solos e minerais. A banda 2 correspondente ao comprimento de onda do vermelho, é a banda com maior absorção do sistema VNIR.

Na Figura 23, é apresentado o resultado do primeiro processamento com a técnica SAM. Os pixels mais claros são os que apresentam maior similaridade com relação à curva espectral do basalto, ou seja, quanto mais claros, maior a probabilidade de ser um pixel puro da classe.

Quanto aos pixels em cores cinza ou negros, indicam uma baixa similaridade espectral, onde a similaridade foi baixa ou nula, mostrando que: 1) a reflectância espectral de outras classes é grande dentro destes pixels; 2) a presença de material da classe rejeito é baixa dentro destes pixels ou 3) não existe reflectância espectral do basalto nestes pixels (aqueles totalmente em cor preta).

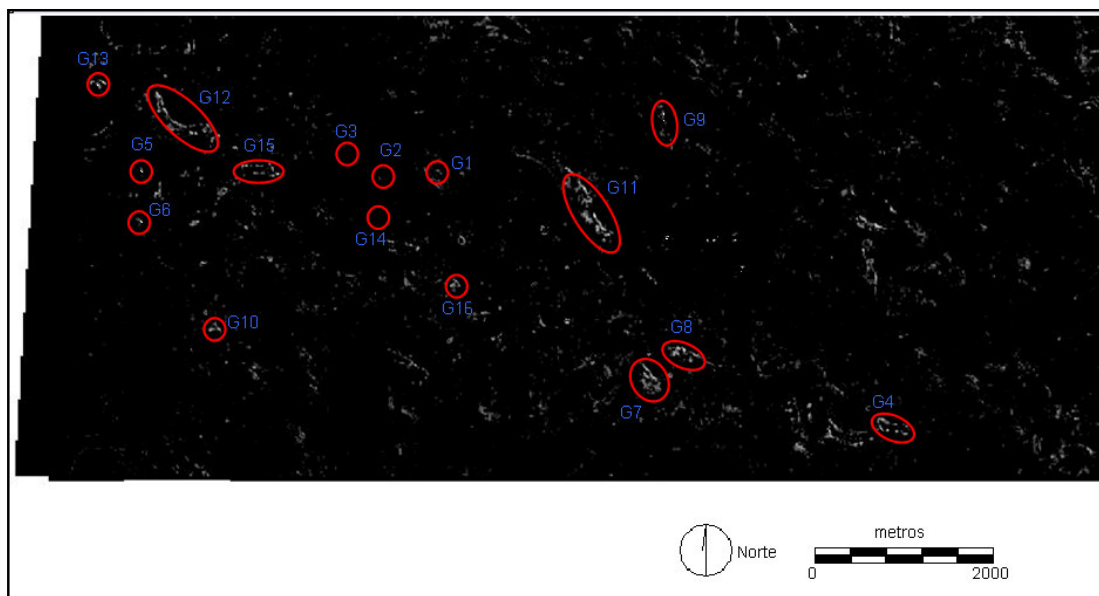


Figura 23. Imagem “rule” gerada no primeiro processamento

Os pontos G2, G3 e G14 não acusaram similaridade espectral com a curva do basalto. A maior parte dos polígonos possui pixels com a cor branca mais saturada indicando claramente a presença de rejeitos e conseqüentemente, de garimpos. A figura ainda mostra outros pontos identificados como “rejeitos”, que não foram mapeados via GPS em campo, indicando a presença de outros garimpos.

O ponto G1 apresentou baixa similaridade espectral, devido principalmente à quantidade reduzida de rejeitos presentes neste local, o qual deve possuir o tamanho inferior a um pixel. É importante salientar que, mesmo com esse tamanho reduzido, a técnica SAM consegue identificar a presença do basalto para estes pixels.

A imagem *rule* gerada no primeiro processamento foi reclassificada, deixando apenas os pixels com valores de ângulos mais baixos, ou seja, com maior similaridade espectral. A seguir, na Figura 24 é apresentado o resultado desta reclassificação:

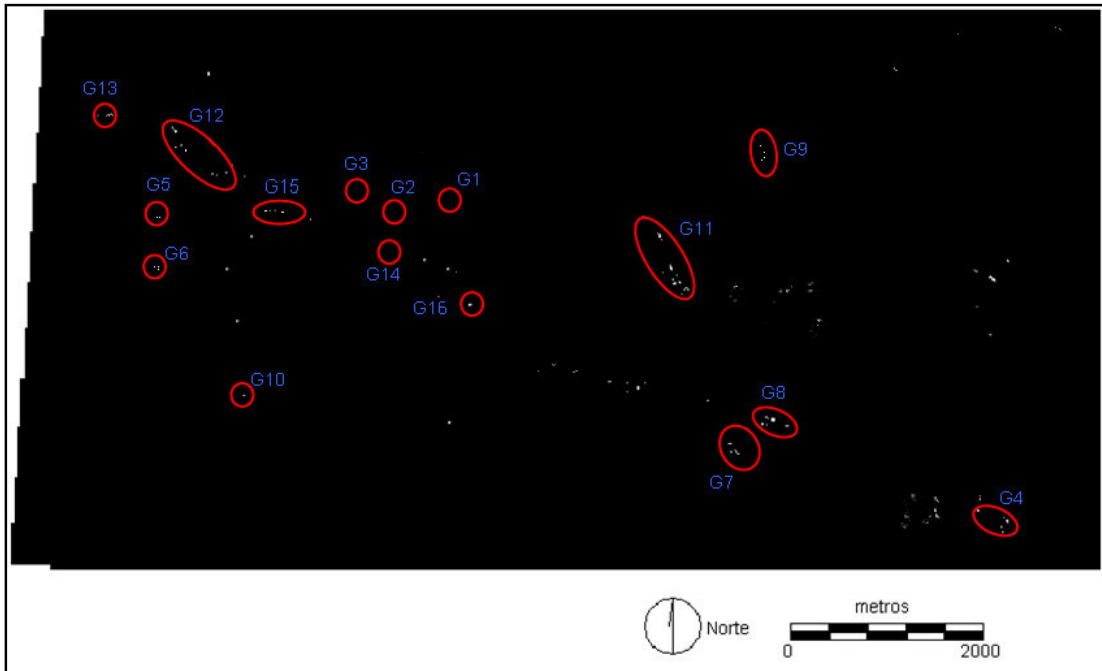


Figura 24. imagem *rule* reclassificada.

Observando a Figura 24, podemos ver nitidamente a redução do número de pixels brancos e cinzas em relação à Figura 23. A vantagem da aplicação desta técnica sobre as técnicas de classificação convencionais é que tem-se um maior controle sobre os resultados que pretende-se obter. Com base na imagem “*rule*”, pode-se filtrar ou classificar apenas os pixels com maior probabilidade de pertencer à classe em estudo, ao passo que nas outras técnicas de classificação, os pixels são classificados de acordo com um intervalo de valores ao qual são mais semelhantes.

Analisando os 16 pontos coletados em campo, quatro deles (G1, G2, G3 e G14) apresentaram baixa similaridade espectral ou quase nula. Isso se deve principalmente ao fato de que eram pontos em que o tamanho dos garimpos era pequeno e, conseqüentemente, a quantidade de rejeito exposto também, representando na imagem ASTER tamanho inferior a um pixel. A Figura 25

apresenta os pontos de rejeitos classificados pela técnica SAM, sobrepostos na Banda 4 do sensor ASTER.

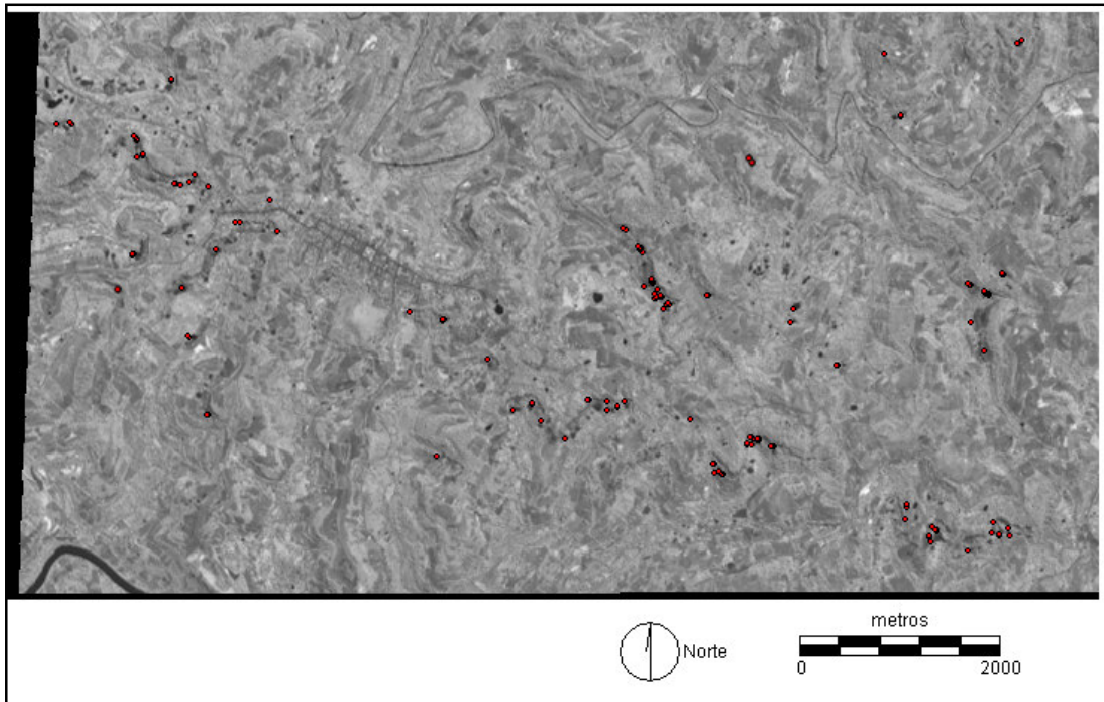


Figura 25. Pontos de rejeitos de garimpos (em vermelho).

A Figura 26 apresenta a mesma imagem da Figura 25, agora com a identificação dos pontos de rejeitos. Os círculos em vermelho destacam o local dos quatro pontos que não foram possíveis identificar a presença de rejeito na imagem. Além da quantidade pequena de rejeito presente no garimpo, outro fator que contribuiu para a não identificação nas classificações foi a grande presença de mata nativa próxima aos pontos.

Classificações com espectros de referência extraídos diretamente das imagens a serem processadas tendem sempre a apresentarem melhores resultados, pois fatores como: condições de iluminação, presença de partículas e aerossóis, influência espectral de outros alvos, etc. já estão associados à imagem

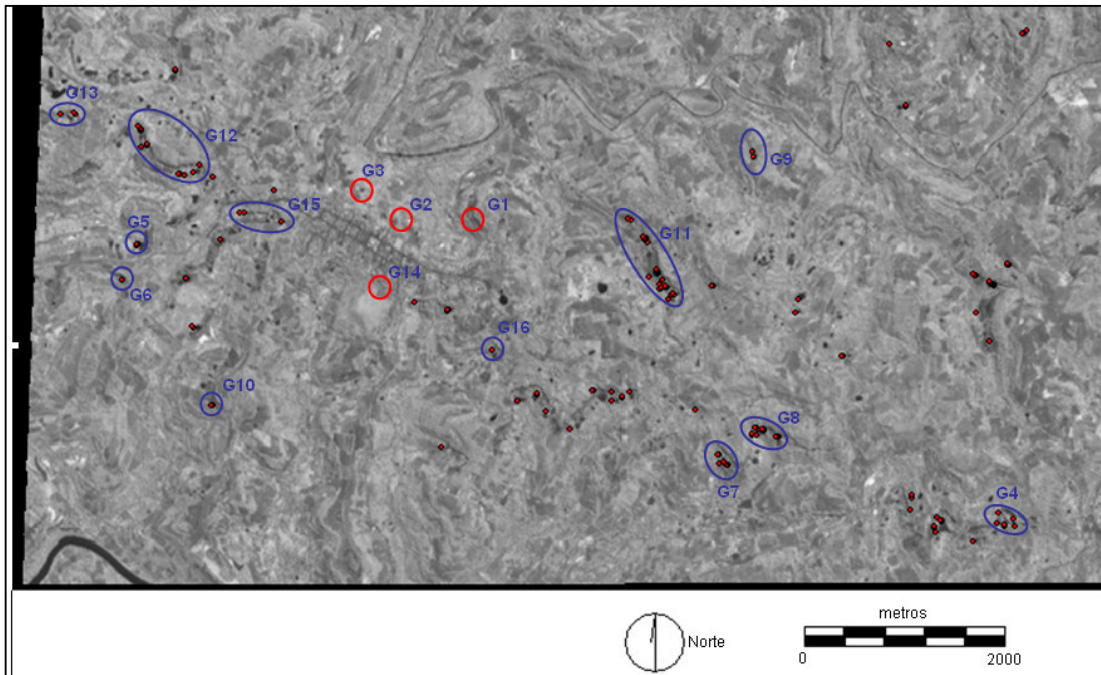


Figura 26: Pontos de rejeitos de garimpos (em vermelho). Os círculos vermelhos são os pontos de rejeitos que não foram identificados corretamente na imagem ASTER

6. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram que as imagens ASTER podem ser muito eficazes para a caracterização mineral, no caso de estudo, os rejeitos (basalto) retirados de garimpos de ametistas.

Em relação às técnicas de processamento digital de imagens, pôde-se concluir que:

1) As técnicas convencionais de classificação (Mínima Distância Euclidiana e Máxima Verossimilhança) produziram resultados satisfatórios no mapeamento de rejeitos de garimpos, principalmente a técnica de máxima verossimilhança. O problema principal se faz na confusão (erro) produzida entre as classes “sombra” e “rejeito”, devido à semelhança espectral dos alvos na região VNIR. Entre os dois classificadores, Máxima verossimilhança produziu melhor resultado, produzindo uma classificação mais pura.

4) Como solução para tentar separar estas duas classes, foi utilizada a Técnica SAM, com base na utilização do espectro de referência: A aplicação da técnica SAM com o espectro obteve bons resultados, conseguindo identificar os pixels com maior similaridade espectral, com boa definição dos pontos com rejeitos.

6) Deve ser destacado que, mesmo áreas da imagem onde a presença de rejeito era pequena, certas vezes, inferior até mesmo que um pixel, a técnica SAM conseguiu identificar a influência espectral do basalto, claro, com um valor de similaridade mais baixo.

7) Com base na análise da fusão das imagens com o MDE construído para a área, foi possível associar a mineralização classificada com o intervalo de cota entre 423 e 450 m, facilitando a exclusão de feições não relacionadas ao garimpo.

9) Os alvos corretamente mapeados na cota 423 e 450 m equivalem aproximadamente ao nível dos derrames do tipo I em que, Gomes (1986) cita também a ocorrência de geodos.

10) A cobertura vegetal, com respeito à influência de áreas de mata nativa presente ao lado dos garimpos, tem grande influência sobre o processo de detecção de padrões espectrais e extração de espectros de referência. Por isso, para a geração de espectros de referência que sejam mais puros e confiáveis, devem ser escolhidas áreas que sejam de um tamanho maior, onde a influência da vegetação e da sombra é menor.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. Distribuição regional e relações tectônicas do magnetismo pós-paleozóico no Brasil. Revista Brasileira de Geociências. São Paulo. v. 16, n.4. pg. 325-349. 1986
- ALMEIDA, T. Modelos exploratórios para a prospecção de Pb/Zn utilizando dados de Sensoriamento Remoto: estudo de caso do Prospecto salobro (Porteirinha-MG). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 132 p. 2000
- AZCURRA, D.; CASTRO G.S.; KAKU, M.; KOHNO, I.; MARIN, G. Procesamiento y productos ASTER del área de Sierra de Famatina. in: Simpósio Brasileiro de sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Anais, 815-822. 2003
- BOARDMAN, J.W.; HUNTINGTON, J.F. Mineral mapping with 1995 AVIRIS data. In: Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 6., Pasadena, March 4-8, 1996. Summaries., NASA.JPL, v.1, p.9-12. (JPL Publication 96-4).
- BOSSI, J. & CAGGIANO, W. Contribucion a la geologia de los yacimientos de ametista del departamento de Artigas (Uruguai). In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXVIII. Anais. P. Alegre, SBG. p. 301-317. 1974
- BRASIL-MA-DMPA-DPP. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. In-Boletim Técnico, 30. Recife, 1973.
- CAMPBELL, N.A. The decorrelation stretch transformation. International Journal of Remote Sensing, v.17, n.10, p.1939-1949, 1996.

CASTRO GODOY, S.E.; URAI M.; KAKU, M.; KOHNO, I. Utilizacion de datos ASTER para el monitoreo de volcanes y identificacion de productos volcánicos. In: Simpósio Brasileiro de sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Anais, 465-473

COMIN-CHIARAMONTI, P.; BELLINI, E.M.; PICCIRILLO, E.M.; MELFI, A.L. Classification and Petrography of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Parana basin (Brazil). USP-SP, 1988

CORDANI, E.G.; SATORI, P.L.P.; KAWASHITA, K. Geoquímica dos isótopos de estrôncio e evolução da atividade vulcânica na Bacia do Paraná (sul do Brasil) durante o Cretáceo. Anais da Academia Brasileira de Geociências. n52 p.811-818. 1980

CRÓSTA, A.P.; SOUZA FILHO, C.R.; AZEVEDO, F. Caracterizando halos de alteração hidrotermal em depósitos auríferos epitermais com os sensores multiespectrais orbitais Landsat/TM e ASTER: o caso do Distrito de Los Menucos, Argentina. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 41., João Pessoa, 2002. Anais. João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia, 2002

DUCART, F.D. Caracterização da alteração hidrotermal associadas as ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e espectroscopia de reflectância. Dissertação de mestrado, UNICAMP-SP. 2004

ENVI. The Environment for Visualizing Images. ENVI user's guide. Research Systems, 948p, 2001.

FRONDEL, C. The system of mineralogy of J.D.. Dana & E.S. Dana, Yale University, 1837-1892 ed. 7 ed. John Wiley & Sons, Inc., New York. 334p

GOETZ, A.F.H.; VANE, G.; SOLOMON, J.E.; ROCK, B.N. Imaging spectrometry for Earth remote sensing. Science, v.228, n.2, p.1147-1153, 1985.

- GOMES, M.E.B.. Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná - região de Frederico Westphalen-RS Brasil. P. Alegre, 264 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UFRGS, 1996
- GREEN, R. O.; CONEL J.E.; ROBERTS, D.A. Estimation of aerosol optical depth, and additional atmospheric parameters for the calculation of apparent reflectance from radiance measured by the airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer. In: Fourth Annual Airborne GeoScience Workshop, 83-86. 1993
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I silicate minerals. Modern Geology. 1970
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: II carbonates. Modern Geology. 1971
- HUNT, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics, v.42, n.3, p.501-513, Apr. 1977.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coleção de Monografias Municipais- Frederico Westphalen, RS. Nova série, n° 448. 16 p. 1985
- JUCHEN, P.L.; HOFMEISTER, T.; BRUM, T.M.M.. Substâncias gemológicas no Rio Grande do Sul - modos de ocorrência e caracterização gemológica. In: Congresso Brasileiro de Geologia, XXXVI. Natal, 1990. Anais. V.3 pg. 1436-1449
- JUCHEN, P.L. Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. 1999

- KRUSE F.A.; KIEREIN-YOUNG, K.S.; BOARDMAN, J.W. Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63-Channel Imaging Spectrometer. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 61, n. 1, p. 83-93, 1990.
- KRUSE, F.A. Combined SWIR and LWIR mineral Mapping using MASTER/ASTER. In: *Proceedings IGARSS*. Toronto, Canada. 2002
- KRUSE, F.A. Spectral Mapping with landsat Thematic Mapper and Imaging Spectroscopy for precious metals exploration. In: *Seventh Thematic Conference on Remote Sensing for exploration Geology*. Calgary, Alberta. 1989
- LIMA, B. E. M.. Avaliação das imagens do sensor ASTER para discriminação espectral de variações faciológicas no granito serra branca, estado de Goiás. *Teses de Doutorado, INPE, São José dos Campos - SP, 2004*
- MANTOVANI M.S.M., CORDANI U.G., ROISENBERG A. Geoquímica isotópica em vulcânicas ácidas da bacia do Paraná, e implicações genéticas associadas. *Revista Brasileira de Geociências*, 15: 61-65. 1985
- MARKOSKI, P.R.; ROLIM, S.B.A. Mapping amethyst mineralizations using classification techniques in aster images: a case study in Ametista do Sul, Rio Grande do Sul state, Brazil. *Barcelona*. 2006.
- MARQUES L.S. DUPRÉ B. PICCIRILLO E.M. 1999. Mantle source compositions of the Parana Magmatic Province (southern Brazil): evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Journal Geodynamics*, 28: 439-458.
- MARQUETTI, C.; MARIN G.; KADU M.; KOHNO L.; YOKOKAWA, K. Procesamientos y analisis de imagenes ASTER para el estudio metalogenético de maliman, San Juan. Argentina. In: *XI Simpósio Brasileiro de sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Anais*, 877-886. 2003

- MELFI, A.J.; PICCIRILLO, E.M.; NARDY, A.J.R. Geological and Magmatic Aspects of the Parana basin - an introduction. USP-SP. 1988
- MENESES, P.R.; NETO, M.S.J. Sensoriamento remoto, reflectância de alvos naturais. 1 ed. 2003
- MINCATO R.L. & SCHRANK A.. Evaluation of the NI-Cu-PGE mineralisation for the Parana Continental igneous Province based on the Noril'sk and Insizwa models In: Laverop N.P. & Distler V.V. (eds.) International Platinum, St. Petersburg Athens. Theophrastus, 107-115. 1998
- MINIOLI, B.; PONÇANO, W.L.; OLIVEIRA, S.M.B. Extensão geográfica do vulcanismo basáltico do Brasil meridional. Academia Brasileira de Geociências. 43, p.433-437. 1971
- MISSIO, E. Proposta conceitual de zoneamento ecológico-econômico para o município de Frederico Westphalen – RS. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, 2003.
- MUSTARD, J.F.; SUNSHINE, J.M. Spectral analysis for Earth Science. Remote Sensing for the Earth Sciences. New York: John Wiley & Sons, p.251-306, 1999.
- PEATE D. W. HAWKESWORTH C.J., MANTONAVI M.S.M. Chemical stratigraphy of the Parana lavas (South America): Classification of magma types and their spatial distribution. Bull. Volcanology, 55: 119-139. 1992
- PETRI, S.; FÚLFARO, J.V. Geologia do Brasil. São Paulo. T. A. Queiroz, USP, 631 p. 1983

- PICCIRILLO E.M.& MELFI A. J. The Mesozoic flood volcanism of the Parana basin: petrogenetic and geophysical aspects, São Paulo, IAG, USP, 600. 1988
- PICCIRILLO, E.M.; MELFI, A.J. Petrogenetic aspects of continental flood basalt-rhyolite suites from the Paraná Basin (Brazil). USP-SP 1998
- PIZARRO, M.A. Sensoriamento remoto hiperespectral para a caracterização e identificação mineral em solos tropicais. São José dos Campos-SP. 195p. (INPE-7249-TDI/693). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- RENNE P.R., ERNESTO M., PACCA I.G., COE R.S., GLEN J.M., PREVOT M., PERRIN M. The age of Parana flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and Jurassic-Cretaceous boundary. Science, 246: 103-107. 1992
- ROISEMBERG, A. Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da província meridional da Bacia do Paraná. porto Alegre, 285 p. (TESE DE DOUTORADO). Instituto de Geociências, UFRGS, 1989
- ROWAN, L.C. & MARS, J.C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. 350-366. 2003
- RUBIM, T.D. Spectral alternation mapping with imaging Spectrometers. In: Eighth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. Denver, Colorado, 13-25. 1991
- SCOPEL, R.M. Estudo dos derrames basálticos portadores de ametistas na região de Ametista do Sul, RS-Brasil. Porto Alegre. Tese de Doutorado. UFRGS, Instituto de Geociências. 1997

- SCOPEL, R.M.; GOMES, M.E.B; FORMOSO, M.L.L.; PROUST, D Derrames portadores de ametistas na região de Frederico Westphalen-Iraí-Planalto-Ametista do Sul, RS-Brasil. In: Congresso Uruguayo de Geologia, Anais p. 243-248. 1998
- SHIMABUKURO, Y.E.; SMITH, J.A. Fraction images derived from Landsat TM and MSS data for monitoring reforested areas. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 21, no. 1, 67-74, 1995.
- SOUZA FILHO, C.R.; TAPIA CALLE, C.H.; CRÓSTA, A.P.; XAVIER, R.P. Infrared Spectroscopy and ASTER imagery Analysis of Hydrothermal alteration Zones at the Quellaveco Porphyry-Copper deposit, southern, Peru. In: proceedings of the American Society for Photogrametry and remoting Sensing (ASPRS) 2003 Annual Conference. 2003
- SOUZA, J. C. Industrialização de ametista no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 191 p. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, UFRGS. 1996
- SWALF, P.S. Modelos exploratórios para depósitos auríferos do tipo Morro do Ouro com base em dados e técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas, 118p. 2000
- TAPIA CALLE, C.H. Estudo de mineralizações de tipo Cu-Pórfiro do Sul do Peru por meio de Sensoriamento Remoto e Aeromagnetometria. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 185p. 2002
- TUMER S., HAWKESWORTH C.J., GALLAGHER K., STEWART K., PEATE D.W., MANTOVANI, M.S.M. Mantle plumes, flood basalts and thermal models for melt generation beneath continents: assessment of a conductive heating model and application on the Parana. Journal of Geophysical. Research. 101: 11505-11518. 1996

VAN DER MEER, F. Can we map swelling clays with remote sensing?
International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v.1,
n.1, p.27-35, 1999.

VIDOTTI R. M., EBINGER C.J., FAIRHEAD, J.D. Gravity signature of the Parana
Basin, Brazil, Earth and Planetary Science Letter, 119: 117 – 132. 1998

WHITE, I.C.. Relatório sobre as Coal Measures e rochas associadas ao sul do
Brasil. Relatório final da comissão dos estudos de minas de carvão de pedra
do Brasil. Imprensa Nacional. Rio de Janeiro, XXVIII, 617 p