

Kelen dos Prazeres Ricaldoni Lima

A Avaliação do Uso de Imagens  
Landsat para a Prospecção de Minério  
Tipo Itabirito, com Baixo Teor de  
Ferro – o Caso da Serra de Bom  
Sucesso, MG

XIII Curso de Especialização em  
Geoprocessamento  
2011



UFMG  
Instituto de Geociências  
Departamento de Cartografia  
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha  
Belo Horizonte  
cartog@igc.ufmg.br

**KELEN DOS PRAZERES RICALDONI LIMA**

**A AVALIAÇÃO DO USO DE IMAGENS LANDSAT PARA A PROSPECÇÃO DE  
MINÉRIO TIPO ITABIRITO, COM BAIXO TEOR DE FERRO – O CASO DA  
SERRA DE BOM SUCESSO, MG**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Geoprocessamento. Curso de Especialização em Geoprocessamento. Departamento de Cartografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro.

**BELO HORIZONTE**

**2011**

L732a Lima, Kelen dos Prazeres Ricaldoni.  
2011 A avaliação do uso de imagens landsat para a prospecção de minério tipo itabirito, com baixo teor de ferro [manuscrito] : o caso da serra de Bom Sucesso, MG / Kelen dos Prazeres Ricaldoni Lima. – 2011. x, 39 f. : il. (color.)

Monografia (especialização em Geoprocessamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2011.

Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro.

Bibliografia: f. 38-39.

1. Landsat (Satélites). 2. Minérios. 3. Ferro. 4. Prospecção mineral.  
I. Elmiro, Marcos Antônio Timbó. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 528

*“Caminhos curtos e longos, retos e curvos, de ascensão e descida,  
estão por toda parte, aguardando ser escolhidos.  
(...) Se possível, opta pelos caminhos do coração.  
Eles, certamente, levarão os teus anseios e a tua vida ao ponto de luz  
que brilha à frente esperando por ti.”*  
(Divaldo Pereira Franco)

## AGRADECIMENTOS

No decorrer de cada trajetória certamente encontramos cúmplices do nosso esforço. Incentivadores, assistentes, conselheiros, motivadores... para todos estes, meus sinceros agradecimentos.

A começar por minha família: pai, mãe, irmãos, sobrinhas. Sei que não me faltará apoio e torcida para as próximas conquistas.

Ao Rômulo, agradeço as constantes provas de paciência, companheirismo, e cumplicidade. Além do bom humor, que alegrou meus momentos mais tensos.

Agradeço aos Professores do curso, em especial ao Charles, na certeza de que seu apoio e incentivo foram essenciais na realização deste trabalho.

Especiais agradecimentos ao professor e orientador Marcos Timbó.

Aos colegas de curso, sou grata pelos momentos de partilhas, principalmente à Lídia e Isabella, cuja convivência tornou as noites de segunda, quarta e quinta mais divertidas.

À MMX, agradeço por me possibilitar este estudo. Igualmente, aos meus amigos e colegas de trabalho.

A Deus, por todos os motivos já citados e pelas oportunidades.

Aluno (a) Kelen dos Prazeres Ricaldoni Lima

Monografia defendida e aprovada em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, em 22 de novembro de 2011, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

  
Prof(a). Msc. Bráulio Magalhães Fonseca

  
Prof(a). Dr(a). Marcos Antônio Timbó Elmiro

## RESUMO

A prospecção mineral é uma atividade que consiste em avaliar o potencial mineral de determinadas áreas. Esta análise pode ser facilitada ou complementada por técnicas de Sensoriamento Remoto, muito úteis em estudos geológicos. Este auxílio contribui para a otimização do processo, permitindo a economia de tempo e recursos. E, tratando-se de ganhos, é interessante analisar a contribuição do uso das imagens do satélite Landsat, já que corresponde a um material inteiramente disponível. Assim, convém testar a viabilidade de empregá-las também na prospecção de minerais com baixo teor de ferro, considerando a tendência de expansão da mineração, que extrapola os limites dos grandes depósitos conhecidos. Este tema foi abordado no presente trabalho, com a finalidade de aplicar algumas técnicas de processamento digital de imagens sugeridas pela literatura: análise de principais componentes e razão de bandas. Os resultados foram bastante satisfatórios, tornando possível identificar a presença de óxidos/hidróxidos de ferro em superfície e, desta forma, delimitar áreas como alvos potenciais para estudos mais detalhados na definição de depósitos minerais.

Palavras-Chave: Landsat, prospecção, Principais Componentes, Razão de Bandas, alvos, ferro.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	ix
1- INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Apresentação.....	1
1.2 – Objetivos .....	2
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	3
2.1 – Prospecção Mineral .....	3
2.1.1 – Exploração Geológica .....	3
2.2 – Sensoriamento Remoto de Rochas e Minerais .....	4
2.3 – Satélite Landsat .....	5
2.4 – Técnicas de Processamento Digital de Imagens – PDI.....	8
2.4.1 – Análise de Componente Principal (Principal Component Analysis – PCA) .....	8
2.4.2 – Razão de Bandas .....	9
3 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	11
3.1 – Caracterização da área de estudo .....	12
3.2 – Geologia da área de estudo.....	15
3.3 – Coleta dos dados de campo .....	19
3.4 – Aplicação das Técnicas de Processamento Digital de Imagens.....	20
3.4.1 – Pré-processamento .....	20
3.4.2 – Análise de Componente Principal (Principal Component Analysis – PCA) .....	20
3.4.3 – Razão de Bandas .....	23
3.4.4 – Classificação Supervisionada .....	27
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	32
5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1 - Curva espectral representativa do hidróxido de ferro .....	5
Figura 2 - Ilustração gráfica das componentes principais .....	9
Figura 3 - Fluxograma da estrutura geral da metodologia .....	11
Figura 4 - Mapa de localização da área de estudo.....	13
Figura 5 - Vista do alto da Serra de Bom Sucesso (NW para SE), mostrando em primeiro plano o Ribeirão Tabuões e ao fundo o relevo tipo “mar de morros” .....	14
Figura 6 - Serra de Bom Sucesso, em destaque na paisagem pela altitude mais elevada comparada ao relevo ao redor.....	14
Figura 7 - Mata nativa preservada em alguns fragmentos na Serra de Bom Sucesso.....	15
Figura 8 - Mapa geológico da área de interesse .....	16
Figura 9 - Itabirito friável intemperizado.....	17
Figura 10 - Itabirito semi-compacto.....	17
Figura 11 - Distribuição dos corpos de itabiritos, na região do Quadrilátero Ferrífero e sua continuação no lineamento Jeceaba-BomSucesso .....	18
Figura 12 - Distribuição dos pontos coletados para caracterização da área de interesse..	19
Figura 13 - Gráfico da Análise das Principais Componentes (ou “ <i>Scree plot</i> ”), mostrando os autovalores correspondentes a cada nova banda (PC) .....	21
Figura 14 - Composição colorida das bandas resultantes da Análise de Principais Componentes .....	22
Figura 15 - Recorte e composição colorida das bandas resultantes da Análise de Principais Componentes (RGB, PC1PC2PC3).....	22
Figura 16 - Mostra da resposta obtida para o afloramento de itabirito (ponto BS53) verificado em campo.....	23
Figura 17 - Imagem resultante da Razão de Bandas 3/1 .....	24
Figura 18 - Recorte da imagem resultante da Razão de Bandas 3/1 .....	24
Figura 19 - Imagem resultante da Razão de Bandas 5/2 .....	25
Figura 20 - Recorte da imagem resultante da Razão de Bandas 5/2.....	26
Figura 21 - Imagem resultante da Razão de Bandas 5/7 .....	26
Figura 22 - Recorte da imagem resultante da Razão de Bandas 5/7 .....	27
Figura 23 - Imagem resultante da reclassificação de todas as bandas provenientes das técnicas de Análise de Principais Componentes e Razão de Bandas .....	28
Figura 24 - Resultado da classificação, com destaque para as evidências de óxido/hidróxido de ferro comum a todas as bandas analisadas .....	31
Figura 25 - Imagem resultante da classificação supervisionada pelo classificador de Máxima Verossimilhança - Maxver. ....	32

Figura 26 - Imagem resultante da classificação de todas as bandas provenientes das técnicas de Análise de Principais Componentes e Razão de Bandas pelo método de extração do pixel verdadeiro (1) para ocorrência de itabirito .....	33
Figura 27 - Gráficos de representação do comportamento espectral de cada substância para as técnicas aplicadas .....	34
Figura 28 - Curva espectral representativa do hidróxido de ferro.....	35
Figura 29 - Representação da PC2 resultante da análise de componentes principais - validação da informação destacada sobre a qual situam-se os pontos coletados em campo e referentes ao minério de itabirito .....	36

## LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 1 – Regiões do espectro mais adequadas ao estudo das propriedades de minerais e rochas, com presença de ferro ou argila .....	4
Tabela 2 - Cronologia dos satélites do programa Landsat (desde 1972) .....	6
Tabela 3 - das bandas espectrais do sensor <i>Thematic Mapper</i> do Landsat 4 e 5 .....	7
Tabela 4 - Características referentes à resolução espacial e espectral do sensor <i>Thematic Mapper</i> .....	8
Tabela 5 - Coordenadas UTM dos vértices da poligonal definida para a análise .....	12
Tabela 6 - Cálculo da média e do desvio para os valores de ND em cada banda .....	29
Tabela 7 - Intervalo de classe interessante para minério de ferro .....	30

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

GPS	- Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NASA	- National Aeronautics and Space Administration (Administração de Aeronáutica e Espaço dos EUA)
PEC	- Padrão de Exatidão Cartográfica
UTM	- Universal Transverso de Mercator (Projeção Cartográfica)
WGS84	- World Geodetic System 1984 (Sistema Geodésico Mundial de 1984)
SAD 69	- South American Datum 1969 (Sistema Geodésico Brasileiro de 1969)
CPRM	- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CODEMIG	- Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
USGS	- U.S. Geological Survey
PCA	- Principal Component Analysis (Análise de Principais Componentes)
CRA	- Conestoga-Rovers e Associados Engenharia Ltda.

# **1 – INTRODUÇÃO**

## **1.1 Apresentação**

O desenvolvimento de novas tecnologias é impulsionado pela busca contínua de conhecimento, isto inclui as tecnologias espaciais, que garantem um saber estratégico sobre o território. Como exemplo, tem-se a obtenção de imagens por sensores remotos, que permite conhecer e analisar regiões diversas na superfície do planeta, inclusive as menos acessíveis por vias terrestres (FLORENZANO, 2007).

O acesso a estes dados tem contribuído para inúmeros estudos de caráter diversificados (ecológicos, ambientais, geoestatísticos). Um exemplo é a aplicação de técnicas de processamento digital de imagens de satélite em estudos geológicos, como ferramenta fundamental na pesquisa de substâncias de interesse econômico. Isso proporciona um ganho à exploração geológica em termos de economia de recursos vinculados à prospecção mineral (atividade associada à descoberta de depósitos minerais) (FOLLADOR, 2004).

Prova disso, é a vasta utilização das imagens Landsat no estudo de áreas potenciais para ferro, sobretudo em regiões como o Quadrilátero Ferrífero, onde se concentram jazidas de minério de alto teor. E estas também podem ser incorporadas à pesquisa de depósitos de minerais com teor de ferro menos elevado, contribuindo para o reconhecimento de novas áreas potenciais.

Nesta pesquisa, a área selecionada está localizada entre os municípios de Bom Sucesso e São Tiago, região Oeste de Minas Gerais. Foi definida para estudo devido à presença de itabiritos, pertencentes ao Supergrupo Minas, com as características necessárias para a avaliação do uso das imagens Landsat na pesquisa de minério tipo itabirito, com baixo teor de ferro.

## 1.2 Objetivos

Considerando o contexto, a pesquisa a ser desenvolvida tem os seguintes objetivos:

- Avaliar se o uso de imagens Landsat na prospecção de minério com baixo teor de ferro é suficiente para gerar resultados que contribuam na delimitação de alvos para pesquisas mais detalhadas.
- Analisar de forma integrada a aplicação das técnicas de Processamento Digital de Imagens (Análise de Principais Componentes e Razão de Bandas), na seleção de alvos para a prospecção mineral.
- Destacar o Sensoriamento Remoto como ferramenta útil para a análise de depósitos minerais.

## **2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 – Prospecção Mineral**

A prospecção mineral é uma atividade que inclui o planejamento, programação e execução de trabalhos que levem à conclusão da existência de depósitos minerais e sua viabilidade. Suas metas não se limitam apenas a encontrar depósitos minerais em determinados lugares, mas também analisar o potencial mineral de uma área ou região (PEREIRA, 2003).

Reis et al. (2006) afirma que “é o setor da indústria mineral que apresenta o maior risco econômico (...). A diferença entre o sucesso e o insucesso da atividade de exploração é a descoberta de um depósito mineral que seja economicamente viável nos padrões econômicos vigentes”.

Exige a utilização das mais diversas tecnologias, que respondam adequadamente à demanda e ofereçam um custo razoável em termos de tempo e recursos financeiros.

Segundo Pereira (2003), acontece em três etapas: exploração geológica, prospecção em superfície e avaliação de depósitos. O presente trabalho tem como foco abordar a etapa que constitui a Exploração Geológica, enfatizando o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto (através de imagens Landsat) na identificação de alvos potenciais para minério de ferro na região de Bom Sucesso (MG).

#### **2.1.1 – Exploração Geológica**

As etapas da Prospecção Mineral envolvem diversas escalas, dependendo da fase em que se encontra a pesquisa e do objetivo a que se pretende. “A Exploração Geológica tem caráter regional e consta do reconhecimento de grandes áreas, utilizando-se de mapas geológicos, geoquímicos, metalogenéticos e geofísicos, imagens de satélite, de radar e aerofotos, dentre outros” (PEREIRA, 2003).

É comum utilizar mapas geológicos, preferencialmente em escalas 1:50.000 e 1:100.000 para respaldar o reconhecimento dos alvos potenciais. Porém, a escassez desses dados (tratando-se de Brasil) dificulta essa análise, gerando a necessidade de se recorrer a outras técnicas, mais acessíveis.

É nesse sentido que o Sensoriamento Remoto (através do Processamento Digital de Imagens de sensores orbitais e multiespectrais) vem desempenhando importante papel na seleção de alvos para pesquisas mais detalhadas. Segundo Reis et al. (2006) “atualmente, a utilização de imagens é premissa básica para qualquer programa de mapeamento geológico”. Além disso, propicia maior rapidez e eficiência para a definição de alvos, na prospecção mineral (REIS et al., 2006).

## 2.2 – Sensoriamento Remoto de Rochas e Minerais

Quando praticamente não ocorre vegetação à superfície, e desta forma, os solos e as rochas são visíveis diretamente por sistemas de sensoriamento remoto, pode ser possível diferenciar os vários tipos de rochas e obter informações sobre suas características (JENSEN, 2009).

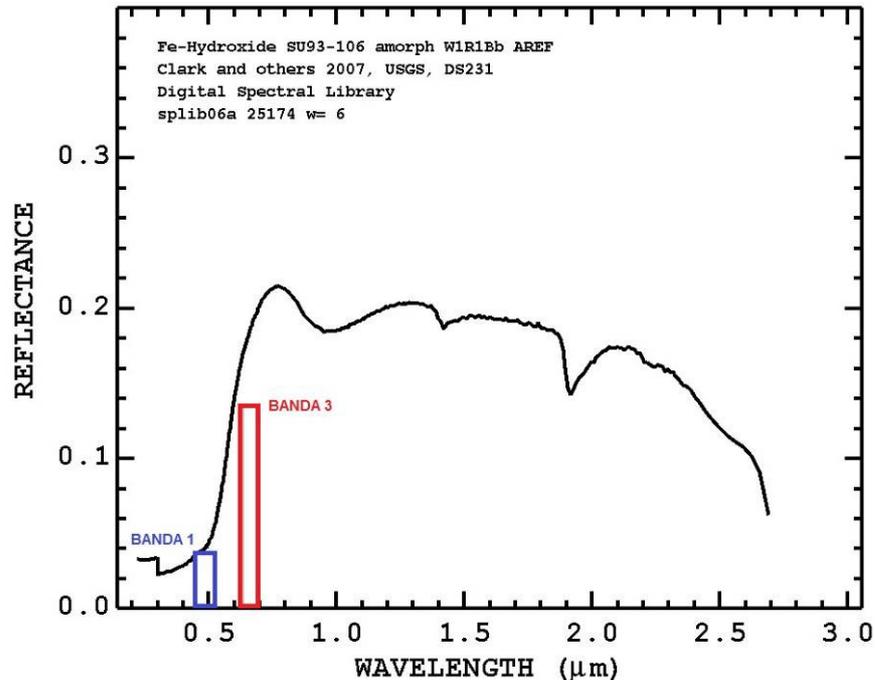
Conhecer as características espectrais destas substâncias reduz o custo tanto de tempo quanto de recursos, durante a análise prospectiva dos minerais de interesse.

A *Tabela 1* apresenta as faixas espectrais utilizadas na detecção da presença de óxidos/hidróxidos de ferro ou argila em função de suas correspondentes bandas de absorção.

Região do espectro	Aplicação
0,44 - 0,55 $\mu\text{m}$	Detecção de ferro: várias bandas de absorção de óxido de ferro
0,80 - 1,00 $\mu\text{m}$	Detecção de $\text{Fe}^{3+}$ (0,92 $\mu\text{m}$ ) e $\text{Fe}^{2+}$ (1,0 $\mu\text{m}$ )
1,60 $\mu\text{m}$	Identificação de zonas de alteração hidrotermal ricas em argila
2,17 $\mu\text{m}$	Detecção de minerais de argila
2,20 $\mu\text{m}$	Detecção de minerais de argila
2,74 $\mu\text{m}$	Detecção de minerais com hidroxila

**Tabela 1** – Regiões do espectro mais adequadas ao estudo de propriedades de minerais e rochas, com presença de óxidos de ferro ou argila (extraído de Guia do Envi em Português – SulSoft)

Em contrapartida, a *Figura 1* mostra a curva espectral para hidróxido de ferro, confirmando a importância das informações presentes nas faixas azul e vermelha do espectro visível, que no caso do satélite Landsat 5 correspondem às bandas 1 e 3 respectivamente.



**Figura 1-** Curva espectral representativa do hidróxido de ferro (extraído da biblioteca espectral da USGS - U.S. Geological Survey - <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>)

Segundo Florenzano (2007) as vantagens de se utilizar o sensoriamento remoto são justificadas pelo fato de que “a delimitação, por meio de imagens, de áreas com provável ocorrência de minerais diminui a quantidade de locais pesquisados em campo, o que permite uma economia de tempo e custo com esse tipo de trabalho que envolve a prospecção mineral”.

### 2.3 – Programa Landsat

O programa Landsat é o sistema de satélites de observação da terra mais antigo dos Estados Unidos (Jensen, 2009), sendo criado na década de 60 e inicialmente chamado de ERTS (*Earth Resource Technology Satellite*), destinado ao monitoramento e estudo dos recursos terrestres.

O primeiro satélite, chamado Landsat 1, foi lançado em 1972 e possuía 4 bandas com resolução espacial de 80 x 80 m. Além deste, os satélites posteriores - Landsat 2 e 3 (todos desativados atualmente) operavam “com o sensor de varredura *Multi Spectral Scanner* (MSS) e a câmera *Return Beam Vidicon* (RBV), (...) substituída, nas plataformas seguintes

(Landsat 4 e 5) pelo *Thematic Mapper*, um sensor de varredura com maior resolução espacial e espectral” (SABINS apud Lima, 2003).

O Landsat 4 foi desativado logo após o lançamento e substituído pelo Landsat 5. Em 1993 o programa lançou o Landsat 6, que diferente dos anteriores possuía o sensor *Enhanced Thematic Mapper* (ETM). Este satélite não chegou a operar devido a falhas operacionais que levaram à sua perda, antes de entrar na órbita terrestre (LIMA, 2003).

O Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), lançado em abril de 1999 marcou o início da terceira geração do programa, trazendo algumas inovações: uma banda pancromática com resolução espacial de 15 metros (banda 8) e um canal infravermelho termal com resolução espacial de 60 metros (banda 6) (JENSEN, 2009).

A cronologia de lançamentos e final de operações dos satélites são mostrados na *Tabela 2*:

Satélite	Datas de Lançamento e Fim de Operação
Landsat 1	23/07/1972 a 06/01/1978
Landsat 2	22/01/1975 a 27/02/1982
Landsat 3	05/03/1978 a 07/09/1983
Landsat 4	16/07/1982 - não está desativado, embora não gere mais imagens desde 1993
Landsat 5	3/1/1984
Landsat 6	05/10/1983, falhou em atingir a órbita
Landsat 7	15/04/1999 - ativo normalmente até 2003
Landsat 8	Aprovado pela OSTP em 23/12/2005

**Tabela 2** – Cronologia dos satélites do programa Landsat (desde 1972). Adaptado de Jensen (2009).

A imagem Landsat utilizada neste trabalho pertence ao satélite Landsat 5. Dessa forma, suas propriedades serão apresentadas nas *Tabelas 3 e 4*, onde a *Tabela 3* descreve as características espectrais das bandas do sensor *Thematic Mapper*, presente nos satélites Landsat 4 e 5. Enquanto a *Tabela 4* traz as principais características referentes à resolução espacial e espectral deste sensor.

Banda	Características
<b>Banda 1: 0,45 – 0,52 µm (azul)</b>	Essa banda tem maior penetração em corpos d'água, assim como fornece suporte para análise de uso da terra, solo e características da vegetação. O limite inferior do comprimento de onda é abaixo do pico de transmitância da água clara. O limite superior é o de absorção por clorofila no azul para a vegetação verde saudável. Comprimentos de onda <0,45µm são substancialmente influenciados por espalhamento e absorção atmosférica.
<b>Banda 2: 0,52 – 0,60 µm (verde)</b>	Essa banda cobre a região entre as bandas de absorção pela clorofila no azul e no vermelho e responde à reflectância da vegetação sadia no verde.
<b>Banda 3: 0,63 – 0,69 µm (vermelho)</b>	Essa é a banda vermelha de absorção por clorofila da vegetação verde sadia e é útil para a discriminação da vegetação. É também útil para delinear os limites de classes de solos e tipos de rochas. Essa banda pode exibir mais contraste do que as bandas 1 e 2 devido ao efeito reduzido da atenuação atmosférica. O limite superior de 0,69µm é importante porque compreende o início de uma região espectral de 0,68 a 0,75µm em que a reflectância muda abruptamente (borda vermelha ou red edge), o que pode reduzir a precisão das investigações da vegetação.
<b>Banda 4: 0,76 – 0,90 µm (infravermelho próximo)</b>	O limite inferior dessa banda foi posicionado acima de 0,75 µm (término da borda vermelha). Esta banda é muito sensível à quantidade de biomassa da vegetação e/ou área foliar presente. É útil para a identificação de culturas e para realçar contrastes entre solo/ cultura e terra/ água.
<b>Banda 5: 1,55 – 1,75 µm (infravermelho médio – SWIR)</b>	Essa banda é sensível à turgidez ou quantidade de água nas plantas. Essa informação é útil em estudos de estresse de culturas e em investigações de vigor das plantas. Essa é uma das poucas bandas que podem ser usadas para discriminar entre nuvens, neve e gelo.
<b>Banda 6: 10,4 – 12,5 µm (infravermelho termal)</b>	Essa banda mede a quantidade de energia radiante infravermelha emitida das superfícies. A temperatura aparente é uma função da emissividade e da temperatura verdadeira (cinética) da superfície. É útil para localizar atividade geotermal, mapeamento de inércia termal para investigação geológica, classificação e análise de estresse de vegetação, e para estudos de umidade de solos. Esta banda frequentemente capta informação única sobre diferenças em aspecto topográfico em áreas montanhosas.
<b>Banda 7: 2,08 – 2,35 µm (infravermelho médio – SWIR – shortwave infrared, ou infravermelho de ondas curtas)</b>	Essa é uma importante banda para a discriminação de formações geológicas de rochas. Ela tem sido efetiva para identificar zonas de alteração hidrotermal em rochas.

**Tabela 3** - Características das bandas espectrais do sensor *Thematic Mapper* do Landsat 4 e 5.

Adaptado de Jensen (2009).

Banda	Faixas do Espectro Eletromagnético cobertas pelo TM	Espectro	Resolução Espacial	Níveis de Quantização
Banda 1	0,45-0,52 $\mu\text{m}$	Azul	30 m	8 bits
Banda 2	0,52-0,60 $\mu\text{m}$	Verde	30 m	8 bits
Banda 3	0,63-0,69 $\mu\text{m}$	Vermelho	30 m	8 bits
Banda 4	0,76-0,90 $\mu\text{m}$	NIR	30 m	8 bits
Banda 5	1,55-1,75 $\mu\text{m}$	SWIR (1)	30 m	8 bits
Banda 7	2,08-2,35 $\mu\text{m}$	SWIR (2)	30 m	8 bits
Banda 6	10,4-12,5 $\mu\text{m}$	TIR	120 m	8 bits
Largura da faixa imageada - 185 km			(valores de 0 a 255)	

**Tabela 4** - Características referentes à resolução espacial e espectral do sensor *Thematic Mapper*. Adaptado de Jensen (2009).

## 2.4 – Técnicas de Processamento Digital de Imagens

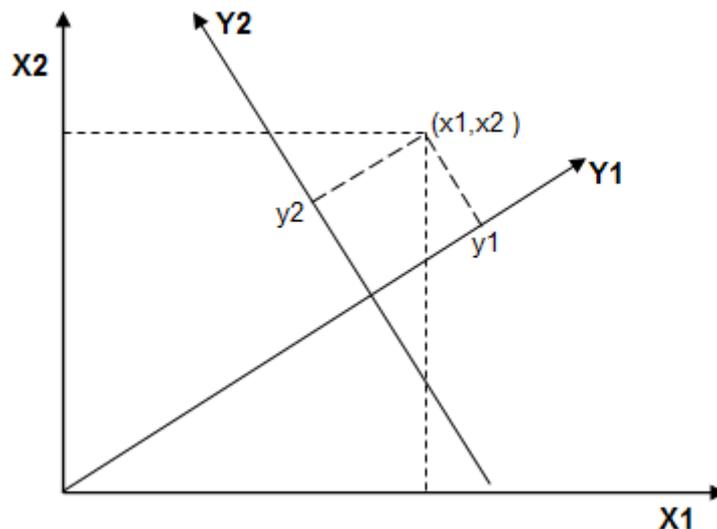
### 2.4.1 – Análise de Componente Principal (*Principal Component Analysis – PCA*)

A análise de Principais Componentes baseia-se nas propriedades estatísticas da imagem, considerando o fato de que as bandas de uma imagem multi-espectral são altamente correlacionadas (visualmente e numericamente similares) (FONSECA, 2000).

Para Maroco (2003) a vantagem de se utilizar esta técnica é “permitir resumir a informação de várias variáveis correlacionadas (...) em uma ou mais combinações lineares independentes (...) que representam a maior parte da informação presente nas variáveis originais”.

Esta técnica contribui para determinar a redundância de informações entre as bandas e remover esta correlação, produzindo outras bandas “descorrelacionadas” e, dessa forma, ampliando a capacidade de extração de informações. Para isso, “basta aplicar uma transformação de rotação dos eixos dos atributos. (...) os eixos originais são rotacionados de modo que os NC’s nos eixos A e B sejam redistribuídos sobre um novo sistema de eixos CP1 e CP2” (FONSECA, 2000).

A *Figura 2* mostra graficamente esta situação, onde cada ponto no sistema de coordenadas  $X_1$  e  $X_2$  é projetado ortogonalmente no novo sistema de coordenadas  $Y_1$  e  $Y_2$ .



**Figura 2** - Ilustração gráfica das componentes principais, onde os eixos originais são rotacionados e os NC's nos eixos  $X_1$  e  $X_2$  são redistribuídos sobre um novo sistema de eixos. (extraído de Mingoti, 2005)

Conhecendo-se a matriz de autovalores o usuário pode escolher as componentes que melhor caracterizam as informações, reduzindo o número de bandas utilizadas no processo. O número de Componentes Principais será igual ao número de bandas.

Segundo Mingoti (2005) “devido à própria forma de construção, a primeira componente principal é sempre a mais representativa em termos de variância total e a *p*-ésima é sempre a de menor representatividade”.

#### **2.4.2 – Razão de Bandas**

Operações matemáticas simples são bastante utilizadas em geoprocessamento, na análise de imagens multiespectrais. A operação é realizada pixel a pixel, resultando em uma banda que corresponde à combinação das bandas originais (FONSECA, 2000).

A razão de bandas é muito usada para realçar feições de interesse, sendo recomendada para a exploração mineral, pois realça o contraste entre os diferentes materiais na imagem, com

as bandas utilizadas devendo ser selecionadas de forma a cobrir máximos e mínimos de absorção do material de interesse (ZACCHI, 2010).

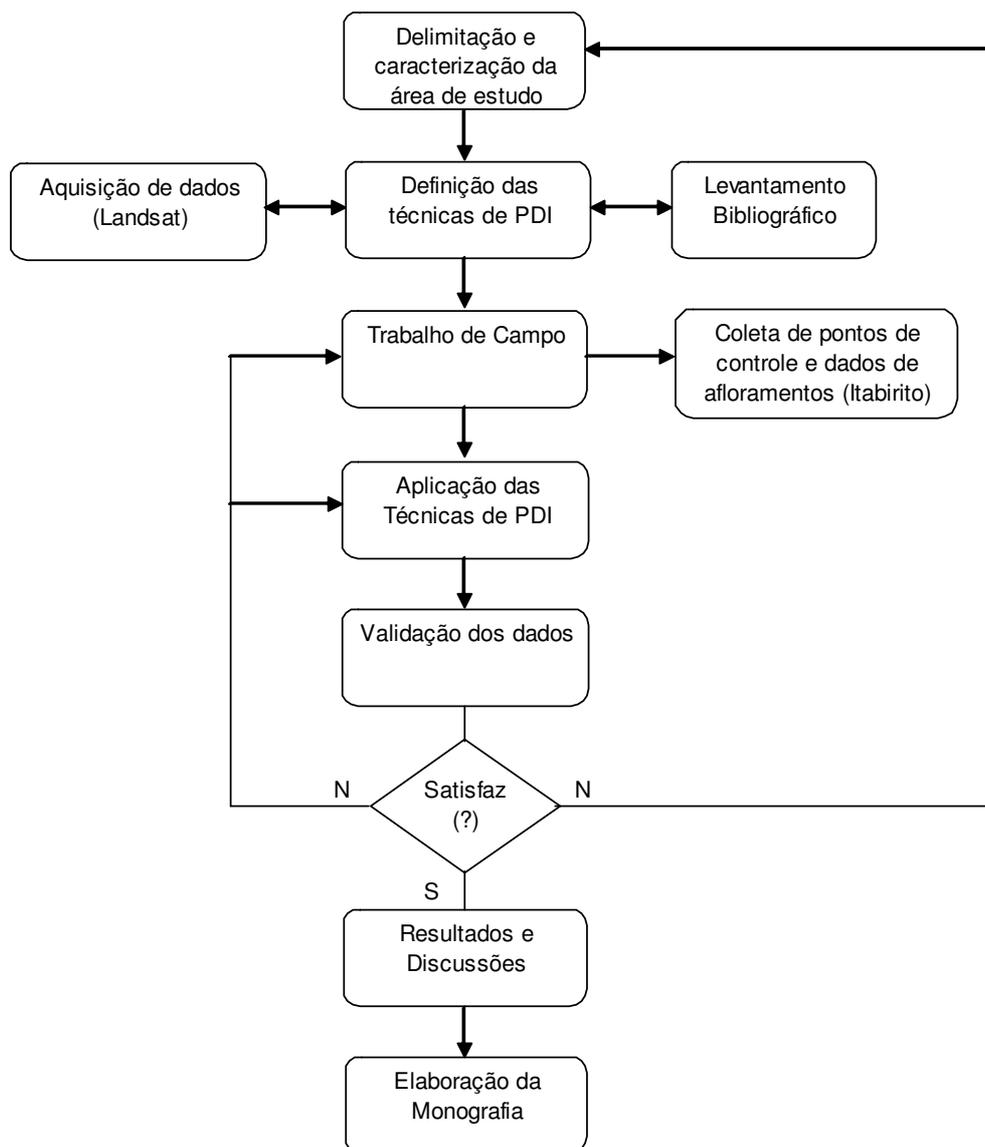
Tratando-se de minério de ferro, recomenda-se a razão entre as bandas 3 e 1, porque, ao contrário da banda 3 a banda 1 tem uma resposta baixa para este tipo de alvo (óxidos/ hidróxidos de ferro). Quando dividimos o ND (nível digital) da banda 3 pelo da banda 1, a imagem resultante corresponderá a um realce dessa informação, onde os pixels em tonalidades mais claras (esbranquiçadas – valores mais elevados) indicarão as áreas com maior concentração em óxidos de ferro. Convém ressaltar, que na razão de bandas o numerador será a banda de valor máximo.

Com relação à utilização do sensor Landsat, a literatura cita ainda, para o caso de superfícies ricas em óxido/ hidróxidos de ferro, as razões ETM 3/1, 3/2, 4/1, 4/3, 4/5, 5/2 e 5/7 (ZACCHI, 2010).

A maioria destas razões (3/1, 3/2, 4/3, 5/1, 5/2, 5/4, 5/7, 7/1, 7/2 e 7/4) são encontradas na literatura, sendo consideradas clássicas para o mapeamento remoto de superfícies ricas em ferro, em imagens TM (LIMA, 2003).

### 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Abaixo, a *Figura 3* mostra as etapas estabelecidas para a realização deste trabalho:



**Figura 3** - Fluxograma da estrutura geral da metodologia.

### 3.1 – Caracterização da área de estudo

A área de estudo localiza-se na Mesorregião do Oeste de Minas Gerais e na Microrregião de Oliveiras, entre as coordenadas 21° 6' 57,407" S a 20° 53' 22,625" S de latitude e 44° 34' 0.054" W a 44° 48' 27.727" W de longitude. Compreende aproximadamente 625 km<sup>2</sup>, ocupando parte dos municípios de Bom Sucesso, São Tiago e Nazareno.

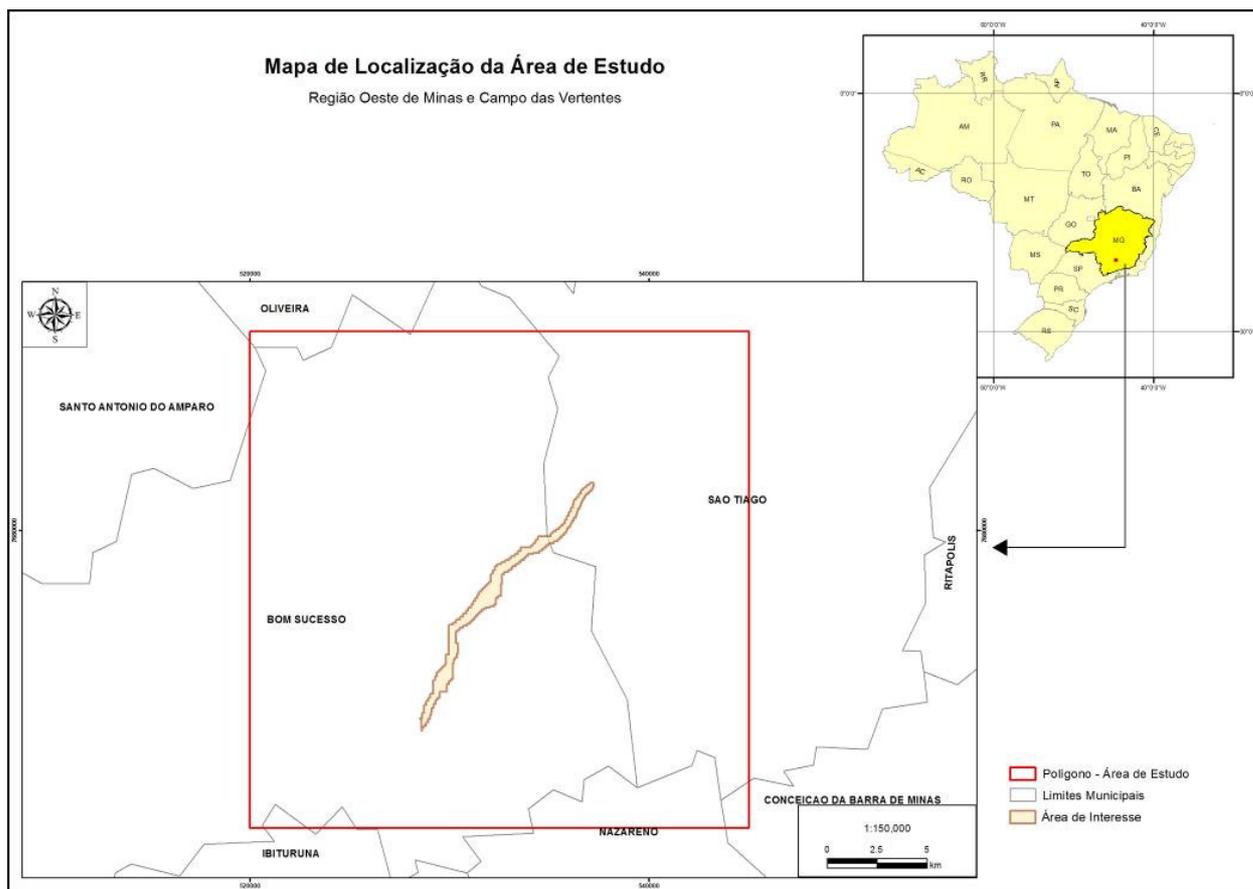
Distante aproximadamente 200 km da capital do estado (Belo Horizonte), sendo o acesso realizado a partir da BR-381 (até o trevo de Bom Sucesso) e MG-332, chegando-se à sede deste município.

A *Tabela 5* traz as coordenadas UTM (em SAD69, zona 23S) dos cantos superiores e inferiores da poligonal estudada.

Vértice	X (m)	Y (m)
1	520.000,00	7.690.000,00
2	545.000,00	7.690.000,00
3	520.000,00	7.665.000,00
4	545.000,00	7.665.000,00
5	520.000,00	7.690.000,00

**Tabela 5** – Coordenadas UTM dos vértices da poligonal definida para a análise

A poligonal definida, cujos vértices foram descritos anteriormente, corresponde à área utilizada na aplicação das técnicas de Análise de Principais Componentes e Razão de Bandas. Porém, a análise e discussão dos resultados concentraram-se e limitaram-se à área de interesse (em destaque na *Figura 4*, aparecendo no centro da poligonal estabelecida). Essa área refere-se à Serra de Bom Sucesso, local escolhido em decorrência ao acesso a dados necessários à esta pesquisa, gentilmente cedidos pela MMX Mineração e Metálicos S.A.



**Figura 4 .** Mapa de localização da área de estudo.

Situa-se na bacia hidrográfica do rio das Mortes, “mais precisamente na margem direita do Ribeirão dos Tabuões, seu afluente” (CRA, 2010). A Serra de Bom Sucesso “representa o divisor de águas das sub-bacias do ribeirão dos Tabuões e do rio Pirapetinga” e por isso apresenta “um grande número de nascentes e cursos d’águas em suas vertentes, e que no caso específico de sua vertente Leste, confluem majoritariamente para o ribeirão dos Tabuões, corpo hídrico de referência local” (CRA, 2010) (*Figura 5*).



**Figura 5** - Vista do alto da Serra de Bom Sucesso (Ribeirão Tabuões – principal rio que corta a área e o relevo tipo “mar de morros” característico da região. (Fonte: arquivos da MMX)

No contexto geomorfológico, o relevo regional apresenta caráter típico montanhoso sendo a Serra de Bom Sucesso bastante proeminente na topografia circunvizinha. O desnível médio entre a crista da serra e o restante do relevo, constituído por morros de forma arredondada é de 400 m. A serra forma uma extensa e alongada crista (aproximadamente 20 km) com direção N30°E, suportada por rochas metassedimentares (formação ferrífera e quartzitos), com cotas máximas variando entre 1.110m a 1.250m (*Figura 6*). Os picos foram resistentes à erosão pela presença de itabiritos ou quartzitos (MMX, 2009). “Os Depósitos Aluvionares se destacam, sobretudo ao longo do Ribeirão dos Tabuões, constituindo amplas áreas com declividades inferiores a 3%” (CRA, 2010).



**Figura 6** – Serra de Bom Sucesso, em destaque na paisagem pela altitude mais elevada comparada ao relevo ao redor (Fonte: arquivos da MMX Mineração e Metálicos SA)

Num contexto geral, segundo a CRA (2010) “a vegetação natural da área, representada originalmente pelas formações da Mata Atlântica e do Cerrado, foi intensamente alterada pela introdução e expansão das atividades agropastoris, predominando na paisagem as áreas de pastagens”, visível na *Figura 6*.

“Atualmente as formações vegetais naturais ocorrem de forma isolada e entremeadas com estas áreas de pastagem e outros tipos de vegetação de menor porte” (CRA, 2010), ou em fragmentos ao longo da Serra de Bom Sucesso (*Figura 7*).

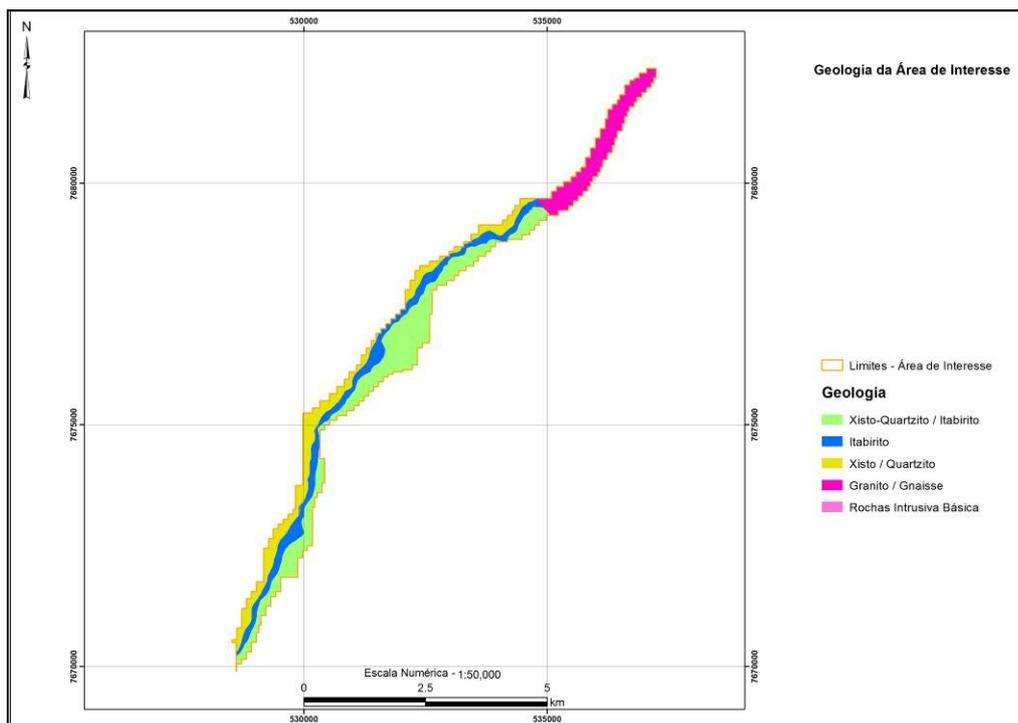


**Figura 7** – Mata nativa preservada em alguns fragmentos na Serra de Bom Sucesso.

### **3.2 – Geologia da área de estudo**

De acordo com Quéméneur et. al. (2002) “a Serra de Bom Sucesso está localizada na extremidade SW de uma zona de cisalhamento (...) que estende-se desde a região do Quadrilátero Ferrífero. (...) é formada por metassedimentos do Supergrupo Minas, correlação esta que resulta da continuidade da camada de itabirito entre a Serra da Moeda, em Jeceaba (...), e a Serra de Bom Sucesso”.

Localmente, ocorrem rochas do embasamento e do Supergrupo Minas. A *Figura 8* mostra a geologia limitada à área de interesse, cujas litologias vêm descritas a seguir.



**Figura 8** – Mapa geológico da área de interesse.

### Embasamento

Relatório técnico da MMX (2009) afirma que “as rochas do embasamento afloram na porção norte da área de interesse, a partir do trecho onde o Ribeirão Tabuões atravessa a Serra de Bom Sucesso, apresentando topografia mais baixa, sendo constituída por granito/gnaiss”.

### Supergrupo Minas

Segundo Quéméneur et. al. (2002) “esta unidade forma uma faixa estreita, com 500 a 1000 m de largura e extensão de cerca de 30 km, orientada na direção N30°E. São reconhecidos três níveis estratigráficos, da base para o topo: i. xisto e quartzito; ii. itabirito; iii. xisto e quartzito”. No relatório técnico da MMX (2009) estes três níveis estratigráficos foram descritos como: Caraça, Itabira e Piracicaba.

#### a) Grupo Caraça

A unidade basal do Supergrupo Minas, associada ao Grupo Caraça, apresenta quartzo biotita xisto e quartzito de granulação fina interestratificados. Na maioria dos afloramentos

estas unidades mostram-se alteradas pelo intemperismo. A espessura deste corpo atinge mais de 200 m na encosta oeste da Serra de Bom Sucesso (MMX, 2009).

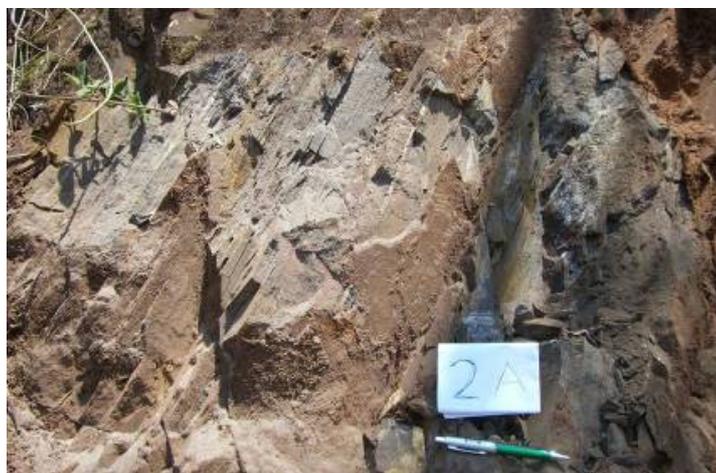
#### b) Grupo Itabira

O Grupo Itabira é representado por itabirito e itabirito dolomítico. O itabirito mostra-se alterado, predominando o tipo friável (*Figura 9*). Em geral tem bandamento milimétrico, com granulometria fina, tanto para o mineral minério, quanto para a ganga, constituída quase que essencialmente por quartzo (MMX, 2009).



**Figura 9** - Itabirito friável intemperizado (Fonte: arquivos da MMX).

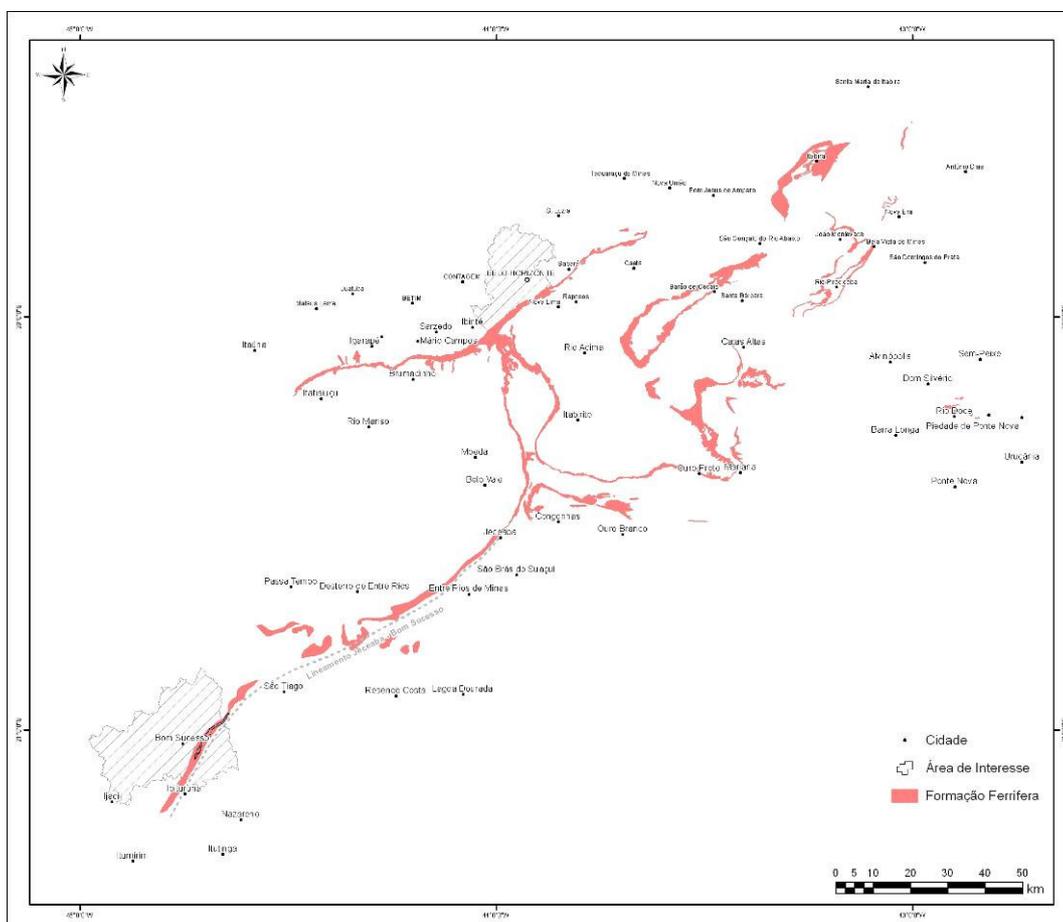
A média profundidade o itabirito passa a semicompacto (*Figura 10*) e compacto com as mesmas características do itabirito friável. O itabirito dolomítico foi detectado em furos de sonda não sendo observado em exposições naturais (MMX, 2009).



**Figura 10** - Itabirito semi-compacto (Fonte: arquivos da MMX).

A camada de itabirito apresenta dois espessamentos importantes; o primeiro ao norte onde a camada alcança cerca de 250m e outro no centro, ao norte do corte do Rio Pirapetinga, atingindo 300 m. No resto da serra a espessura do itabirito não passa de 40m (QUÉMÉNEUR et. al., 2002).

A *Figura 11* mostra a distribuição dos corpos de itabiritos, na região do Quadrilátero Ferrífero e sua continuação no lineamento Jeceaba-BomSucesso (Supergrupo Minas), a partir de dados da CPRM (levantamento geológico em escala de 1:1.000.000 - folhas SE.23 e SF.23).



**Figura 11** – Distribuição dos corpos de itabiritos, na região do Quadrilátero Ferrífero e sua continuação no lineamento Jeceaba-BomSucesso (Adaptado de MMX, 2009 e Neri, 2011).

De acordo com Neri (2011), “a formação ferrífera bandada, na Serra de Bom Sucesso, tem um teor médio de ferro de 25% e em nenhum furo de sondagem foi observado a presença de corpos de alto teor (percentagem maior que 60%). Observa-se que nas porções mais

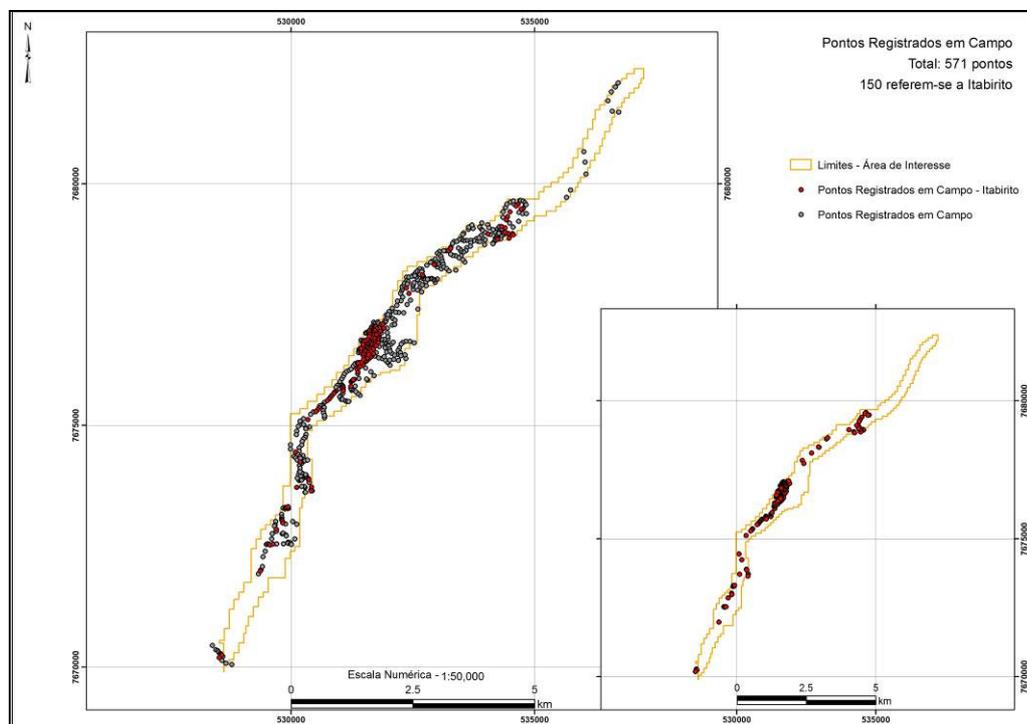
próximas à superfície o teor relativo de ferro aumenta, chegando a 45%, por enriquecimento supergênico”.

### c) Grupo Piracicaba

O Grupo Piracicaba está exposto na encosta leste da Serra de Bom Sucesso. A unidade é representada por quartzo mica xisto granatífero com quartzito sericítico interestratificados. Apresenta ainda lentes de itabirito intercaladas no xisto. A espessura desta unidade é da ordem de 400m (MMX, 2009).

### 3.3 – Coleta dos dados de Campo

Durante as pesquisas realizadas pela empresa MMX, foram detectados e levantados diversos pontos de afloramento de minério tipo itabirito. Esses dados foram gentilmente cedidos para essa análise e serão usados para a classificação das imagens. A *Figura 12* mostra a localização destes pontos e sua distribuição dentro da área de interesse.



**Figura 12** - Distribuição dos pontos coletados para caracterização da área de interesse

Obteve-se um total de 571 pontos, dos quais 150 fazem referência a minério tipo itabirito. Além dos itabiritos destacam-se as evidências de quartzito, e espesso manto de intemperismo (aqui denominado solo).

### **3.4 – Aplicação das Técnicas de Processamento Digital de Imagens**

Para esse estudo foi selecionada uma cena do sensor Thematic Mapper, a bordo do satélite Landsat 5 (Ponto 218, Órbita 75), imageada em 13/05/2010.

Todos os procedimentos de pré-processamento e as técnicas de PDI foram realizadas no Envi e no Arcgis.

#### **3.4.1 – Pré-processamento**

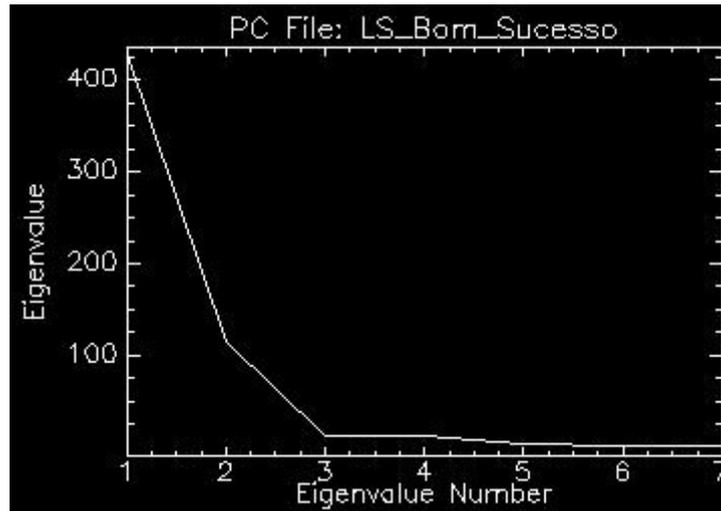
O registro da imagem Landsat foi realizado através do método “*Select GCPs: Image to Image*”, utilizando-se como base uma imagem Landsat já registrada (adquirida no site *Global Land Cover Facility*, endereço: <http://glcfapp.glc.f.umd.edu:8080/esdi/index.jssp> - acessado em 26/10/2011).

Inicialmente estabeleceu-se o mesmo sistema de coordenadas (SAD 69, zona 23 sul), em seguida definiram-se os pontos de controle (6 pontos, polinômio de 1º grau).

A imagem foi salva em formato TIFF/ GEOTIFF para ser utilizada no ArcGis.

#### **3.4.2 – Análise de Componente Principal (*Principal Component Analysis – PCA*)**

Segundo Perrota (2005), “como no geral, a informação espectral contida num conjunto de bandas é bastante redundante, normalmente no caso de sensores multiespectrais como o Landsat as 3 ou 4 primeiras componentes principais resumem mais de 90% de toda a informação contida na cena”. Neste caso, o resultado dos autovalores é mostrado no gráfico abaixo (*Figura 13*), confirmando a importância das três primeiras componentes na quantidade de informações.



**Figura 13** - Gráfico da Análise das Principais Componentes (ou “*Scree plot*”), mostrando os autovalores correspondentes a cada nova banda (PC). (Fonte: resultante do procedimento realizado no Envi para verificação dos autovalores das bandas da cena Landsat utilizada).

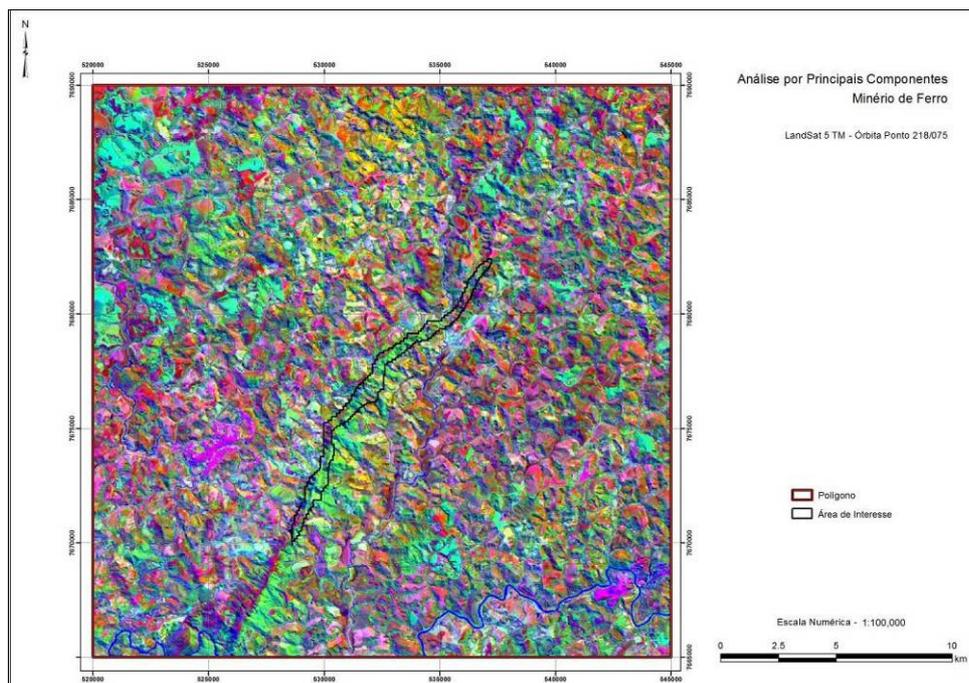
Pela análise podemos constatar que a primeira componente possui um valor que corresponde a aproximadamente 71% da variância total, a segunda componente possui cerca de 18%, a terceira componente 3% e assim consecutivamente até explicarmos 100% da variabilidade total.

Outra regra para escolha do número de componentes principais é a partir da análise visual do ‘*Scree plot*’, onde “devem selecionar todas as componentes até que a linha que as une comece a ficar horizontal, i.e. que apresente um declive reduzido” (MAROCO, 2003).

Dessa forma, o usuário pode escolher as componentes que melhor caracterizam as informações a serem extraídas, reduzindo-se o número de bandas utilizadas no processamento (compressão de dados) (FONSECA, 2000).

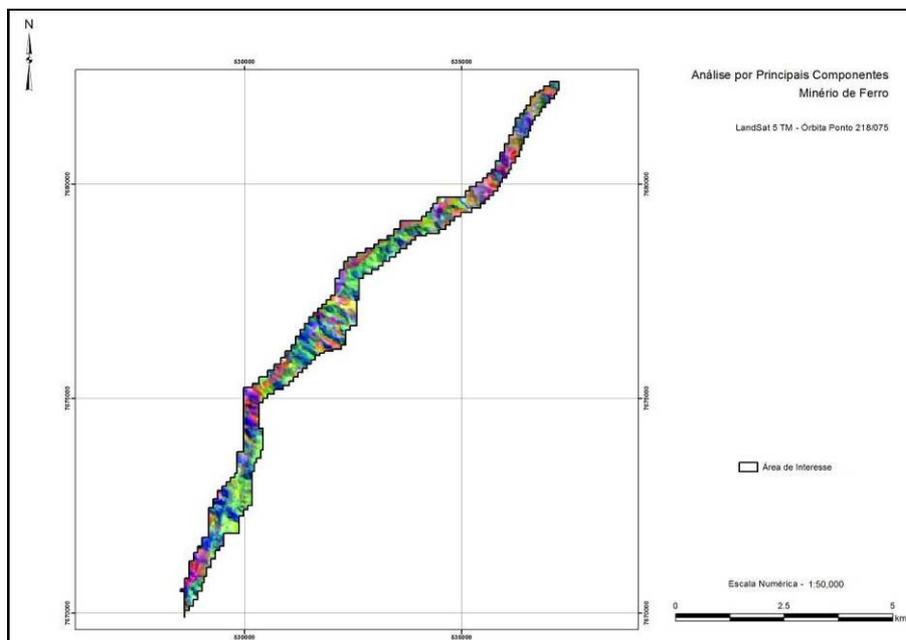
Sendo assim, somente as três primeiras bandas da imagem Landsat foram utilizadas para essa análise, por resumirem quase que totalmente as informações necessárias.

As Figuras 14 e 15 mostram o resultado da Análise de Principais Componentes para as bandas 1, 2 e 3 da imagem Landsat. No sentido de favorecer a observação e verificação da imagem, optou-se pela composição colorida RGB (PC1PC2PC3). É possível distinguir a rede de drenagem, os centros urbanos e áreas de vegetação densa.



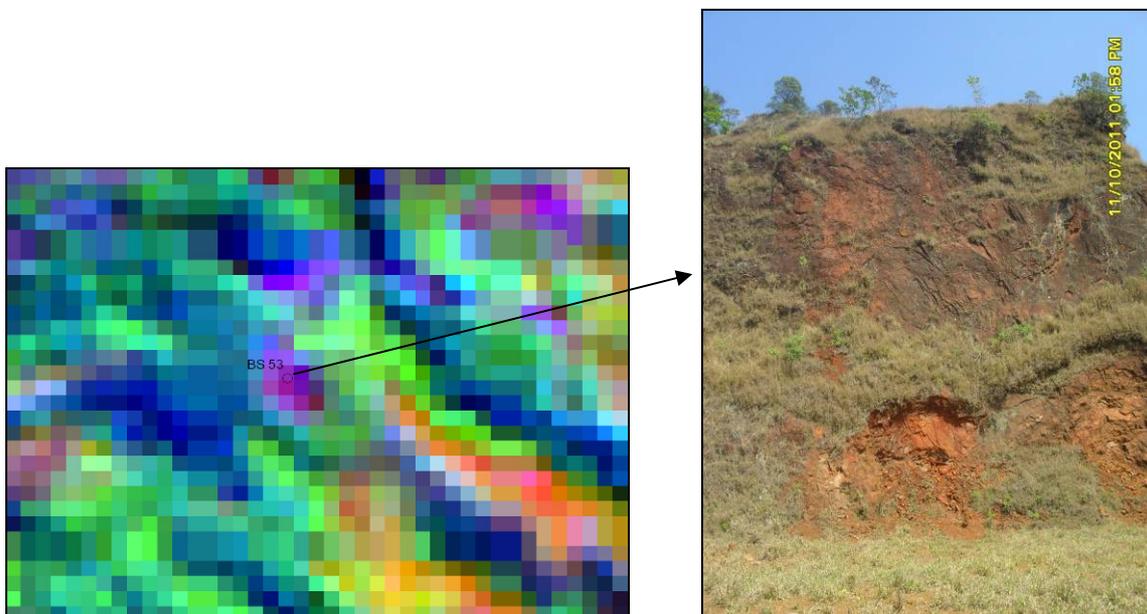
**Figura 14** - Composição colorida das bandas resultantes da Análise de Principais Componentes (RGB, PC1PC2PC3).

Nos limites da área de interesse (*Figura 15*) alguns pontos em tons lilás correspondem a possíveis ocorrências de itabirito.



**Figura 15** - Recorte e composição colorida das bandas resultantes da Análise de Principais Componentes (RGB, PC1PC2PC3). A imagem foi limitada à área de interesse.

A resposta da verificação para o ponto BS53 (Bom Sucesso) é boa, onde se pode distinguir o afloramento de itabirito semi-compacto, comparando-o à resposta obtida com a análise de componentes principais, na composição RGB (PC1PC2PC3) – em tom lilás (*Figura 16*).

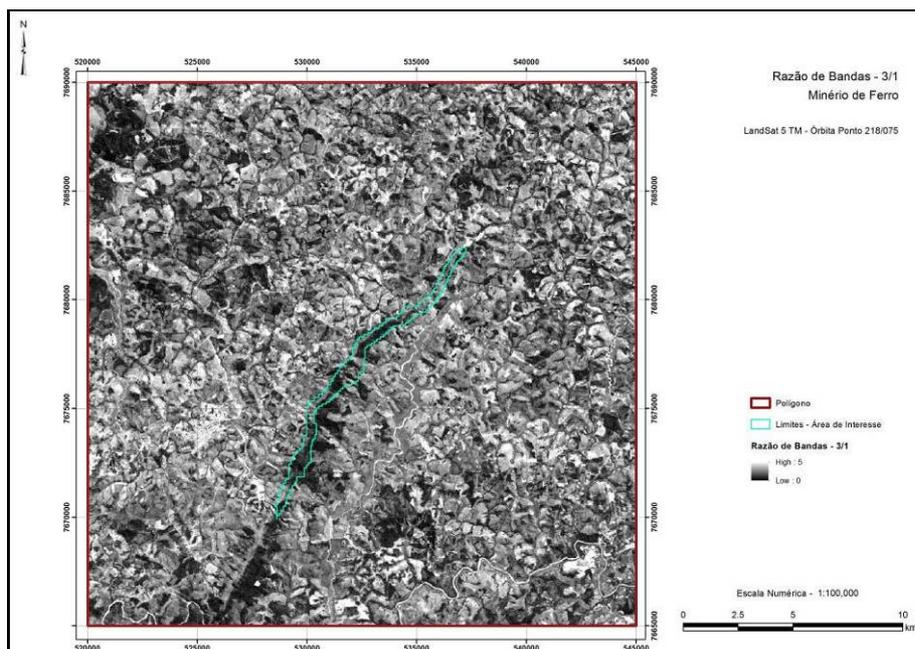


**Figura 16** – Mostra da resposta obtida para o afloramento de itabirito semi-compacto (ponto BS53) verificado em campo (E: 531.558,217 e N: 7.676.513,858)

### 3.4.3 – Razão de Bandas

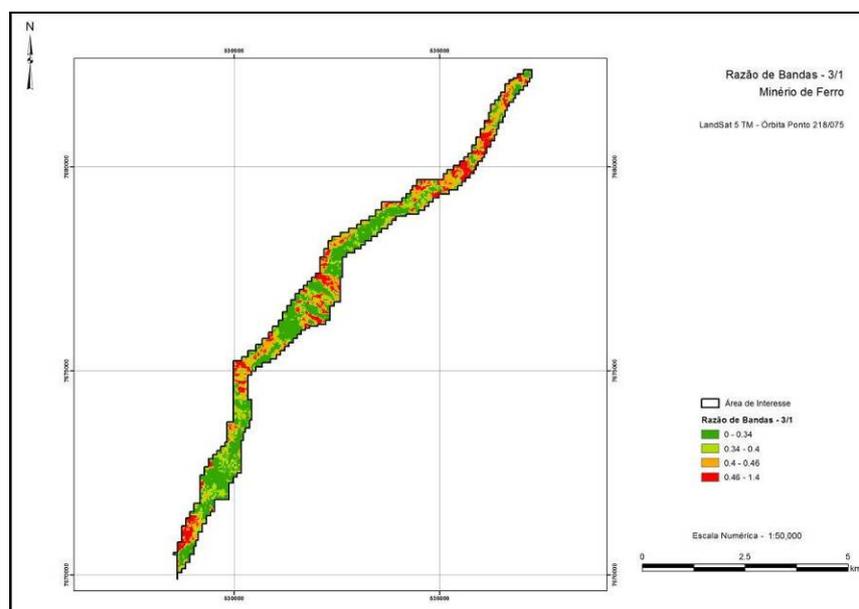
As razões de bandas aqui utilizadas foram selecionadas dentre as várias opções sugeridas por outros autores. Aquelas que apresentaram resultados mais significativos foram as razões 3/1, 5/2 e 5/7, apresentadas a seguir.

A *Figura 17* mostra o resultado da aplicação da razão entre as bandas 3/1, onde os pixels em tonalidade mais clara correspondem aos de maior valor e, nesse caso, diz respeito também às ocorrências de óxidos de ferro, já que esta substância apresenta valor máximo na banda 3 e mínimo na banda 1.



**Figura 17** - Imagem resultante da Razão de Bandas 3/1. Os pixels de cor mais clara (branca ou próximo disso) correspondem aos de maior valor de ND.

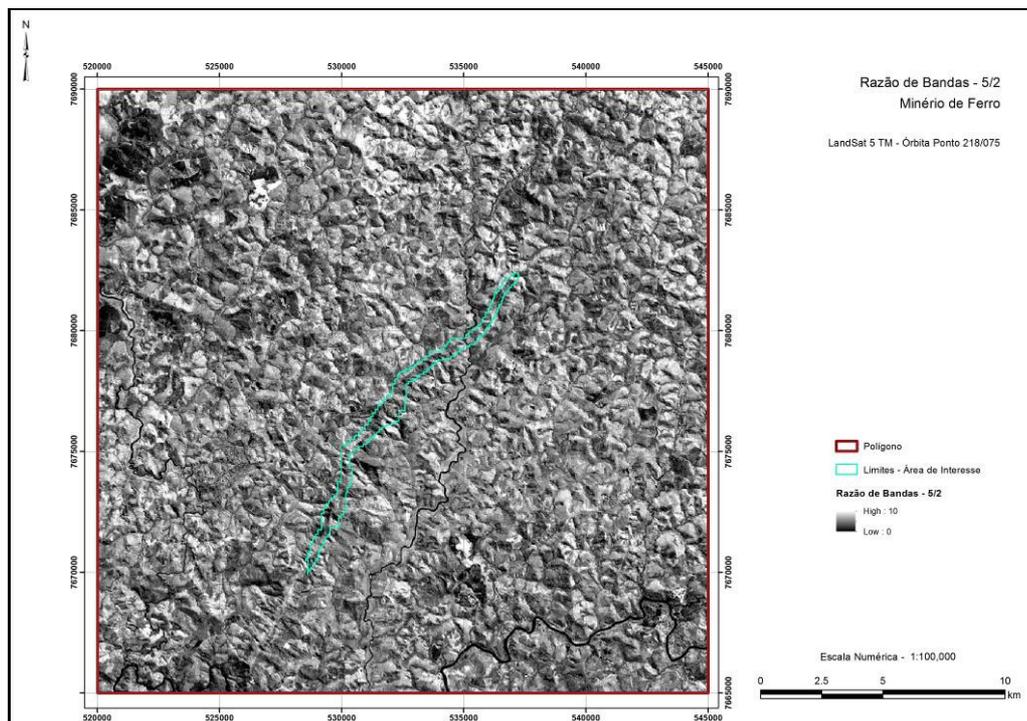
Na tentativa de favorecer a observação e análise do resultado, os dados foram limitados à área de interesse e empregou-se uma nova simbologia aos valores representados, de forma a destacar a substância de importância, conforme mostrado na *Figura 18*.



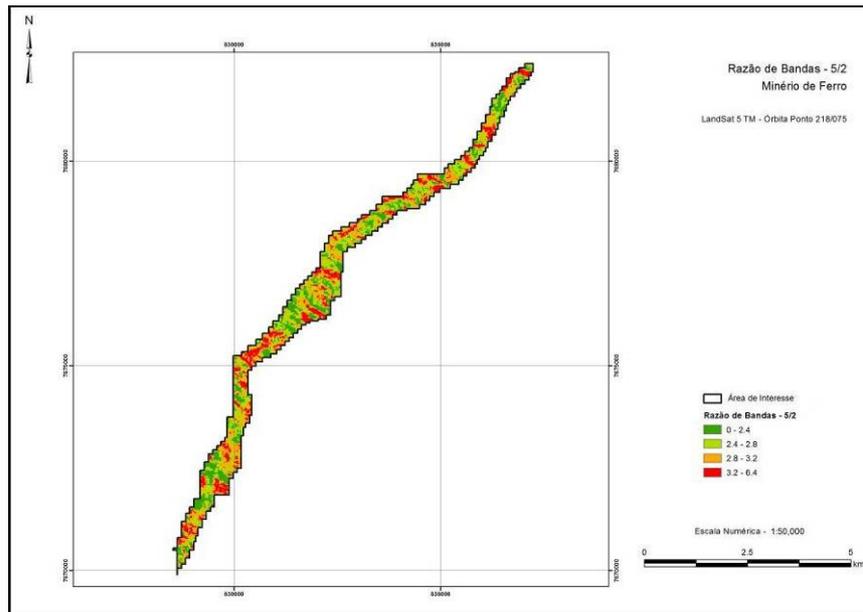
**Figura 18** - Recorte da imagem resultante da Razão de Bandas 3/1 (a imagem foi limitada à área de interesse). Aplicação de nova simbologia para destacar os valores obtidos.

O mesmo procedimento foi adotado para as bandas 5/2, com resultado similar ao anterior, onde os maiores valores podem estar ligados a ocorrências de óxidos de ferro. Analisando-se a curva espectral para hidróxidos de ferro, verifica-se que esta substância tem um elevado índice de reflectância na banda 5 e de absorção na banda 2, o que representa o contraste entre estas duas, gerando um resultado semelhante ao da razão de bandas 3/1.

As Figuras 19 e 20 correspondem à razão de bandas 5/2, nas quais a primeira mostra um resultado mais regional e a segunda concentra a análise nos limites da área de interesse.

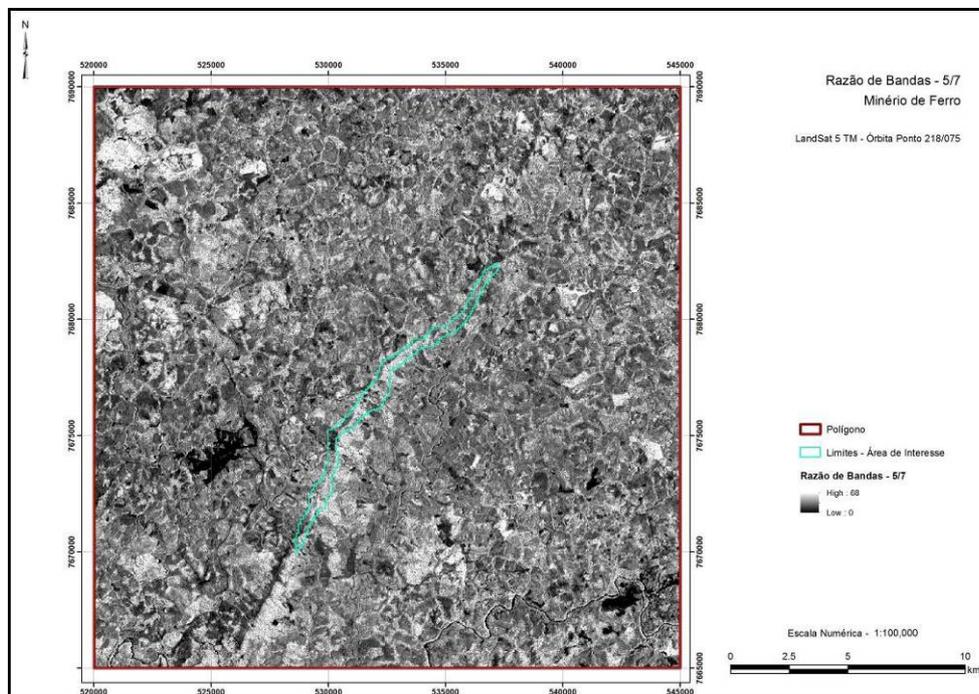


**Figura 19** - Imagem resultante da Razão de Bandas 5/2. Os pixels de cor mais clara (branca ou próximo disso) correspondem aos de maior valor de ND.



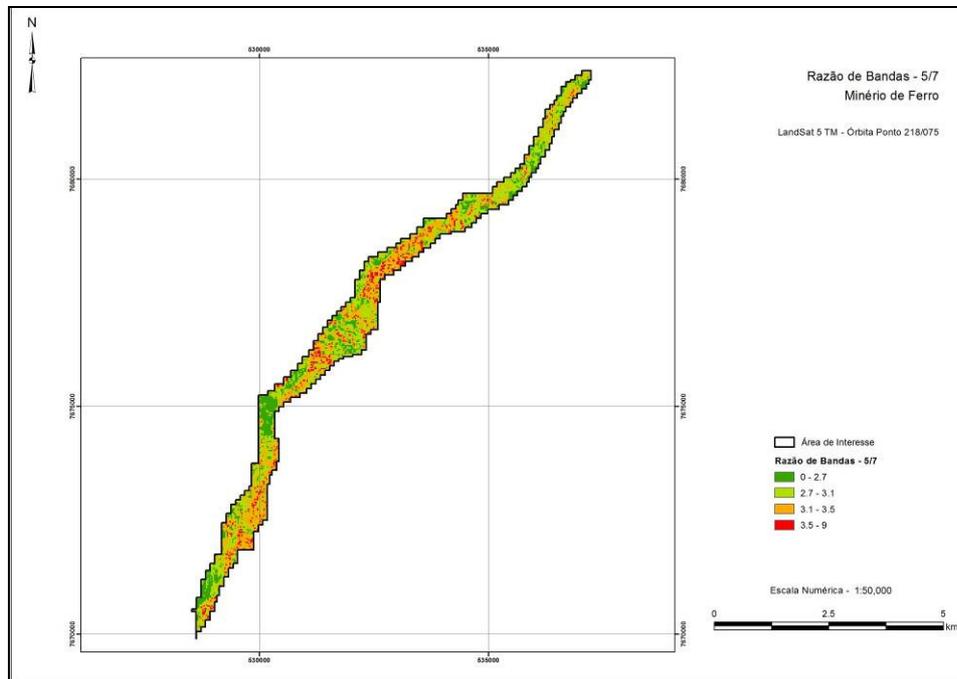
**Figura 20** - Recorte da imagem resultante da Razão de Bandas 5/2.

Em contrapartida, como a razão das bandas 5/7 é mais recomendada à prospecção de argilas e hidroxilas, tem-se um resultado indireto, mostrando que as possíveis ocorrências de óxidos de ferro estão relacionadas aos menores valores.



**Figura 21** - Imagem resultante da Razão de Bandas 5/7. Os pixels de cor mais clara (branca ou próximo disso) correspondem aos de maior valor de ND.

As Figuras 21 e 22 trazem o resultado desta operação, novamente em uma escala mais regional e outra limitada à área de interesse.



**Figura 22** - Recorte da imagem resultante da Razão de Bandas 5/7 (a imagem foi limitada à área de interesse). Aplicação de nova simbologia para destacar os valores obtidos.

### 3.4.4 – Classificação Supervisionada

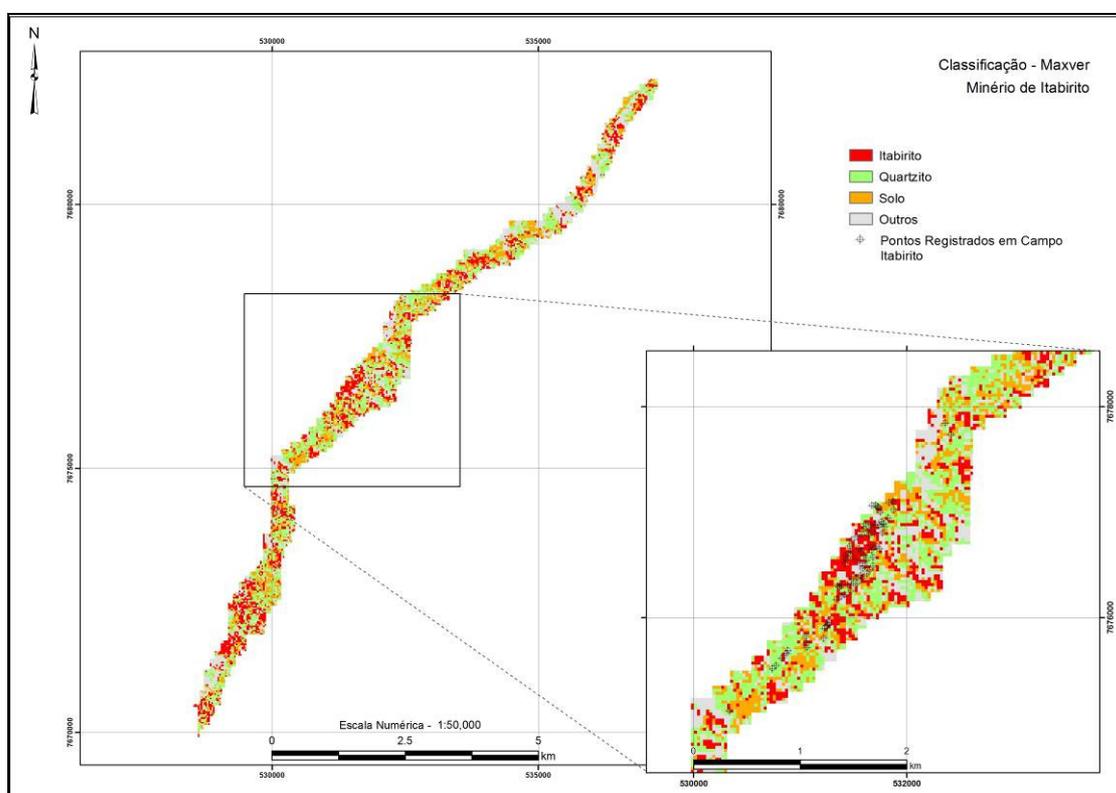
A classificação corresponde à última etapa da análise digital das imagens, na qual serão extraídas informações temáticas, a partir da classificação dos pixels similares espectralmente. Esse processo é importante para evidenciar a distribuição das classes (ou substâncias estabelecidas) na área estudada.

Para isso, criou-se um arquivo de assinatura, no qual foram definidas as quatro classes mais representativas para os pontos coletados em campo: 1 – Itabirito, 2 – Quartzito, 3 – Solo e 4 – Outros. Convém salientar que aqui a classe “Solo” representa a camada mais superficial resultante de intemperismo, podendo conter inclusive incidências das outras classes definidas.

Este arquivo será utilizado para a classificação de todas as informações obtidas anteriormente (provenientes da análise de principais componentes e razão de bandas).

O classificador utilizado foi o método da Máxima Verossimilhança, ou “Maxver”, que “permite descrever uma categoria através de uma função de probabilidade, a partir da sua matriz de variância-covariância e dos valores médios” (FOLLADOR, 2004). Neste processo, o valor de cada pixel é associado “à classe que maximiza a função de probabilidade, estimada a partir das medidas sobre as amostras” (FOLLADOR, 2004). Para o caso específico, esses valores referem-se ao arquivo de assinatura criado anteriormente.

O objetivo é o de verificar a distribuição espacial das quatro classes estabelecidas (1-Itabirito, 2-Quartzito, 3-Solo, 4-Outros) dentro da área de estudo. A *Figura 23* mostra o resultado da classificação.



**Figura 23** - Imagem resultante da classificação supervisionada de todas as bandas provenientes das técnicas de Análise de Principais Componentes e Razão de Bandas.

Outro processo foi utilizado para classificar as imagens, mas neste caso somente para verificar a distribuição dos óxidos/hidróxidos de ferro.

Consiste em extrair os valores de cada banda (resultante da análise de componentes principais e razão de bandas), correspondente a cada ponto de campo, para se ter uma

estatística dos valores de ND resultantes nas técnicas. Para cada análise calcula-se a média e o desvio padrão. Esses valores vão determinar o intervalo de classes na classificação das bandas. A *Tabela 6* mostra os resultados encontrados:

	Classe	Média	Desvio Padrão
Razão 3/1	Itabirito	0.36133	0.06769
	Quartzito	0.36876	0.06733
	Solo	0.36466	0.07213
	Outros	0.37715	0.08512
Razão 5/2	Itabirito	2.67687	0.49159
	Quartzito	3.08661	0.76024
	Solo	2.83068	0.45535
	Outros	2.67081	0.57812
Razão 5/7	Itabirito	2.93367	0.37963
	Quartzito	3.22153	1.17053
	Solo	3.03883	0.36057
	Outros	2.89796	0.39371
PC1	Itabirito	77.99275	52.34494
	Quartzito	104.00000	48.16415
	Solo	91.02069	51.10928
	Outros	85.58621	58.18302
PC2	Itabirito	121.08696	65.59725
	Quartzito	138.72414	66.42498
	Solo	143.04828	62.55443
	Outros	129.05172	72.37049
PC3	Itabirito	117.57971	45.17198
	Quartzito	92.65517	43.77807
	Solo	105.31034	39.87897
	Outros	125.62069	49.32059

**Tabela 6** – Cálculo da média e do desvio para os valores de ND em cada banda.

Com base nos números acima, foi possível definir os intervalos de classe interessantes para a pesquisa de minério de ferro, em cada uma das bandas. Os intervalos vêm discriminados na *Tabela 7*:

Banda	Intervalo de classe interessante para minério de ferro
Razão 3/1	0.29364 - 0.42903
Razão 5/2	3.16846 - 2.18528
Razão 5/7	2.55403 - 3.31330
PC1	25.64781 - 130.33769
PC2	55.48970 - 186.68421
PC3	72.40773 - 162.75169

**Tabela 7** - Intervalo de classe interessante para minério de ferro, definido a partir da soma e subtração dos valores da média e do desvio.

Os intervalos mostrados acima correspondem aos valores ideais para a ocorrência de óxidos/ hidróxidos de ferro em cada banda utilizada na análise. Na aplicação da classificação das bandas esses intervalos receberão o valor “1”, que representa o valor verdadeiro na classificação binária.

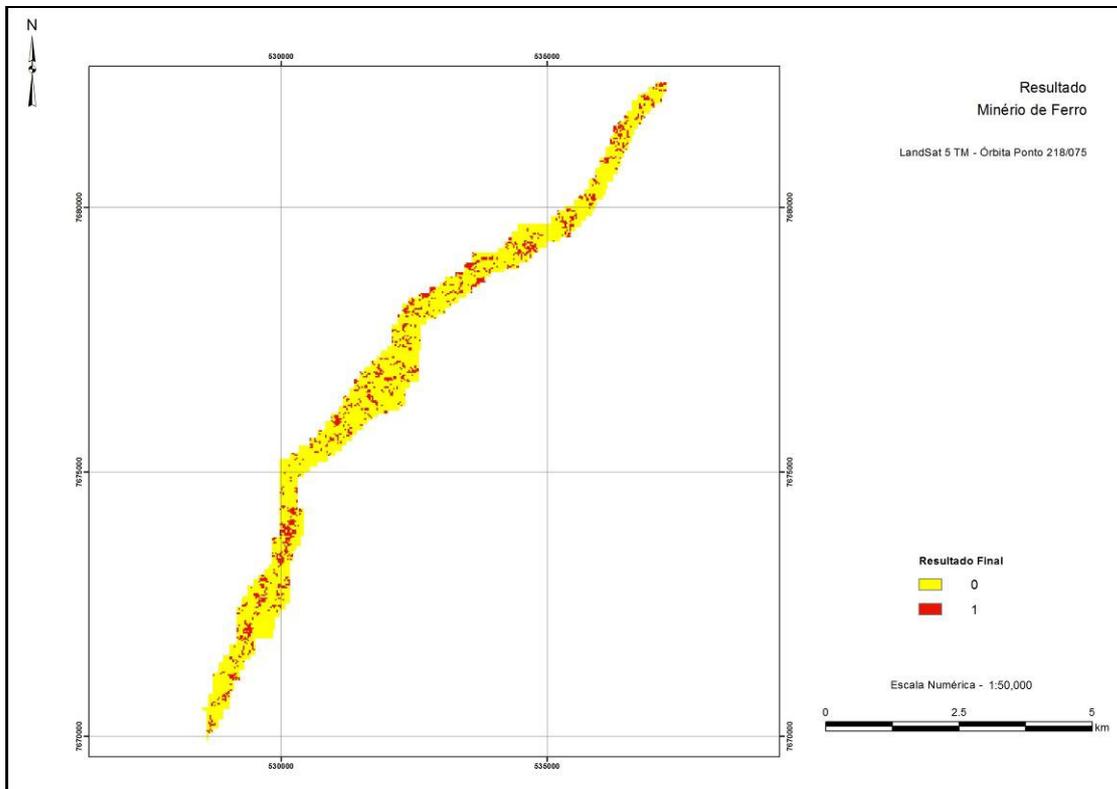
Estabelecidos os intervalos, as bandas passarão por uma classificação, onde serão definidas 3 classes, sendo a primeira igual ao menor valor do intervalo (estabelecido acima), a segunda o maior valor do intervalo e a terceira o maior valor existente para a banda específica. Como exemplo, para a classificação da banda Razão 3/1 as três classes são: 1ª classe: 0,29364; 2ª classe: 0,42903; 3ª classe: 1,3125; gerando os seguintes intervalos:

- 0 – 0,29364
- 0,29634 – 0,42903 (este é o intervalo de interesse para ferro)
- 0,42903 – 1,3125

Durante a classificação, o primeiro e o terceiro intervalo receberão valor “0” (falso) e o segundo intervalo, valor “1” (verdadeiro), pois é o intervalo de interesse para ferro. Este procedimento será realizado com todas as seis bandas envolvidas.

O objetivo final desta técnica é identificar os valores verdadeiros para a existência de minério de ferro comum a todas as bandas analisadas. Para isso, a operação matemática recomendada é a multiplicação de todas as bandas (classificadas para os intervalos citados

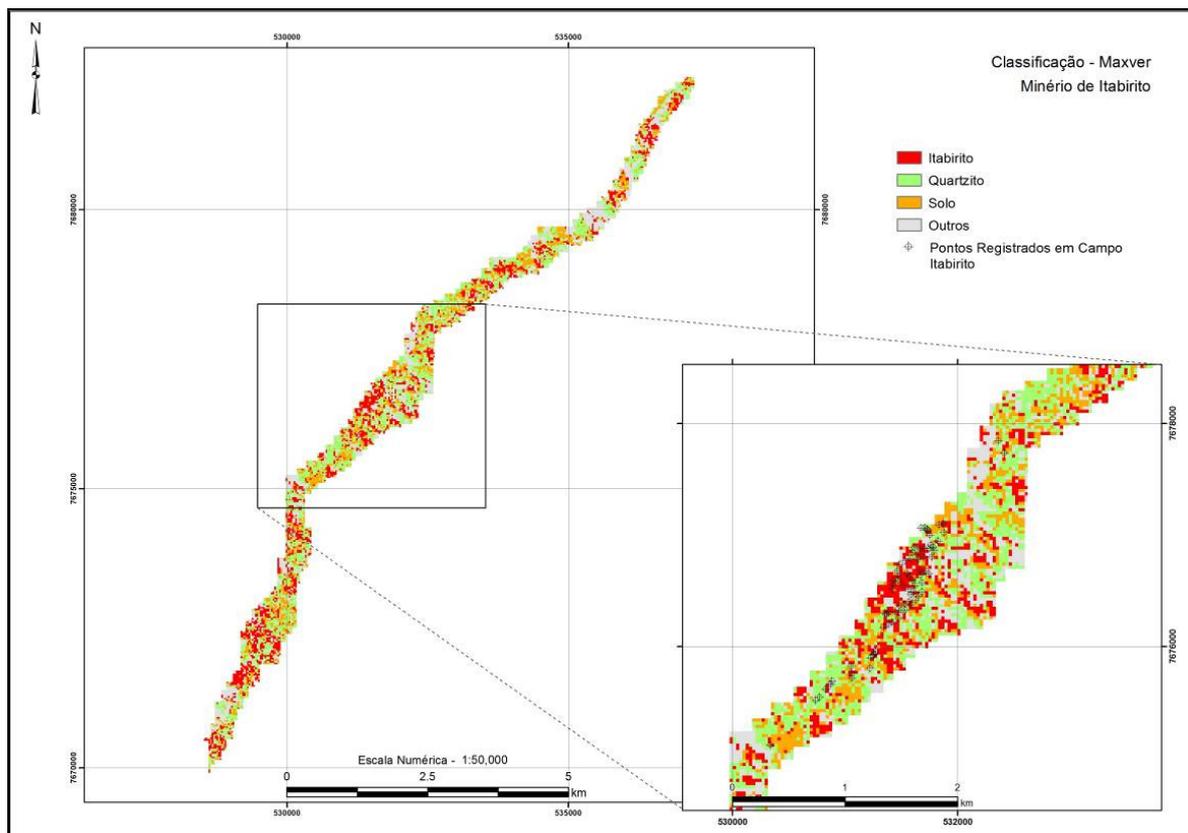
acima), cujo resultado será uma imagem que apontará para os pixels com valor igual a 1 (verdadeiro) em todas as bandas (*Figura 24*).



**Figura 24** – Resultado da classificação, com destaque para as evidências de óxido/hidróxido de ferro comum a todas as bandas analisadas.

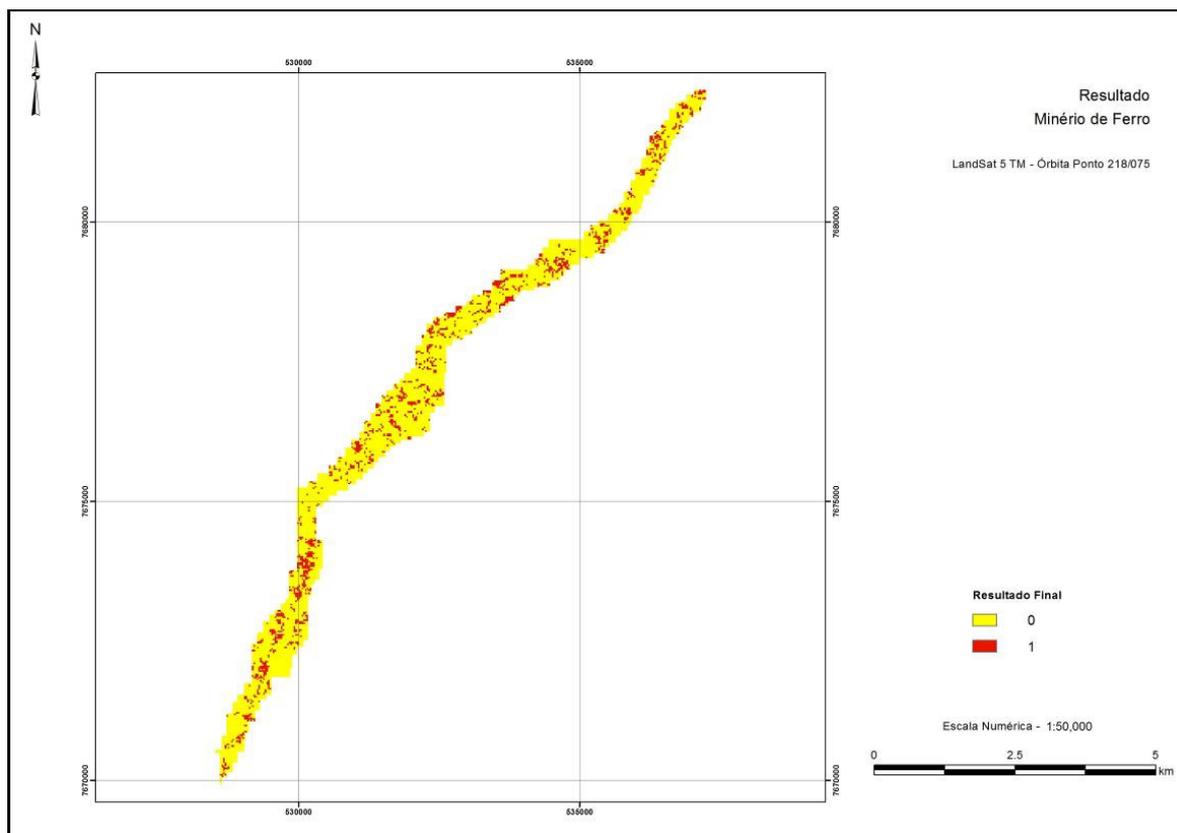
#### 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A classificação supervisionada trouxe informações relevantes para a análise, mas mostrou que o comportamento espectral semelhante para algumas classes pode dificultá-la, tornando o resultado confuso. Apesar disso, percebe-se que muitas evidências do minério de ferro (pixels com resposta para óxidos/ hidróxidos de ferro) coincidem com pontos coletados em campo, sendo esta uma forma de validar a relevância das informações obtidas na classificação (em destaque na *Figura 25*).



**Figura 25** - Imagem resultante da classificação supervisionada pelo classificador de Máxima Verossimilhança - Maxver.

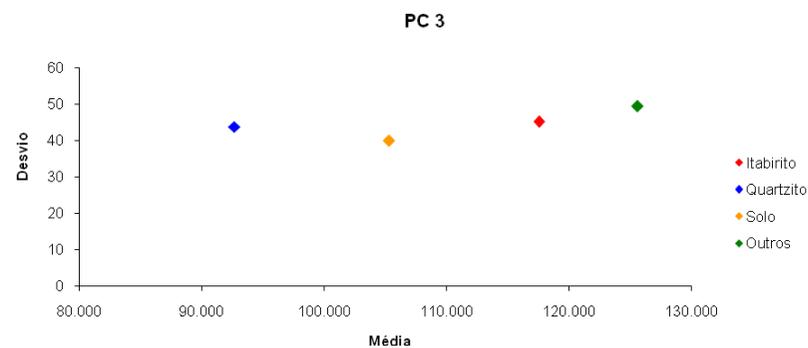
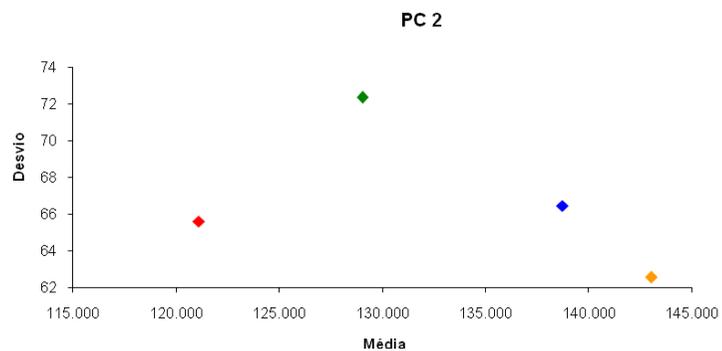
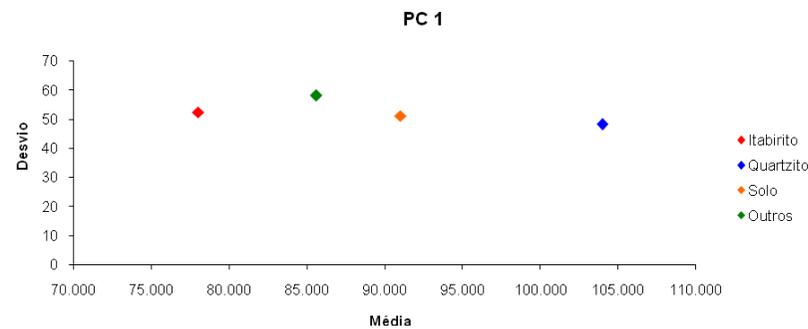
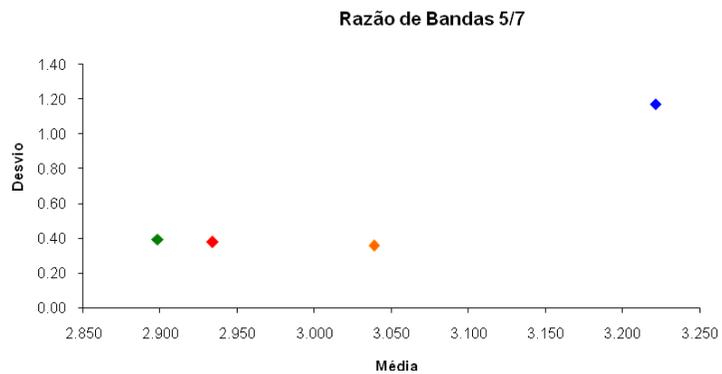
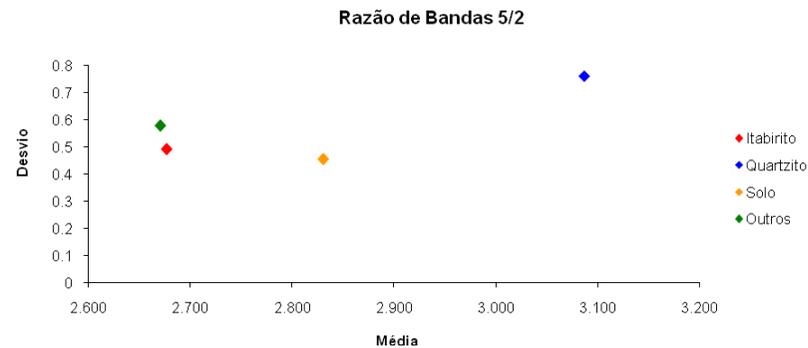
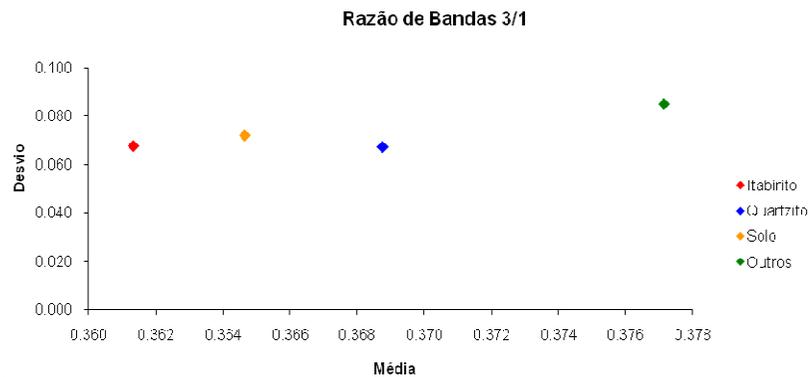
O outro procedimento adotado para a classificação dos dados definiu de forma semelhante a distribuição do itabirito nos limites da área de interesse (*Figura 26*).



**Figura 26** - Imagem resultante da classificação de todas as bandas provenientes das técnicas de Análise de Principais Componentes e Razão de Bandas pelo método de extração do pixel verdadeiro (1) para ocorrência de itabirito.

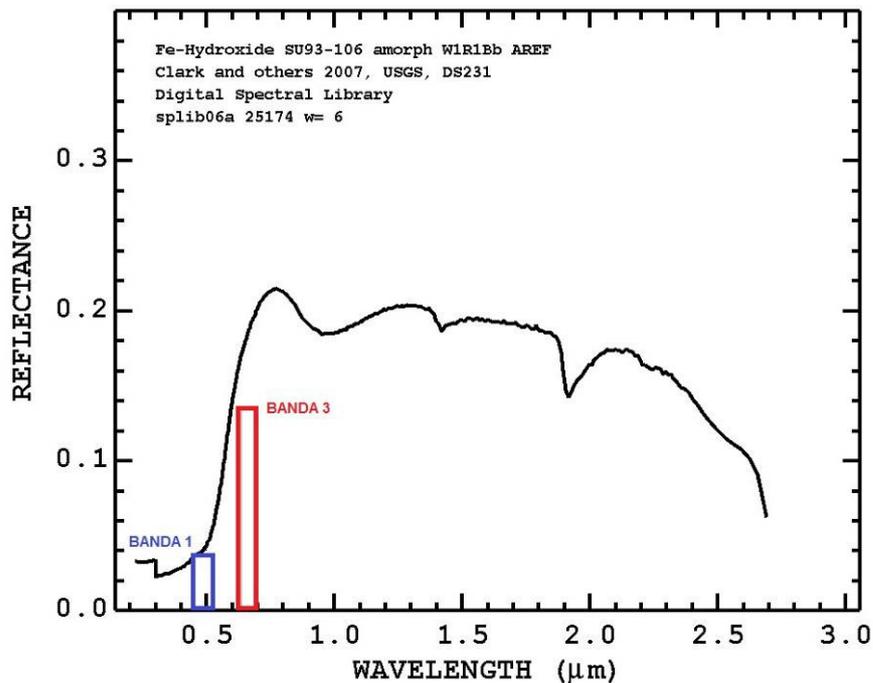
Para validar o resultado, verificou-se a quantidade de pontos coletados em campo e referentes ao itabirito que coincide com os pixels de valor verdadeiro para este mineral. Nessa análise obteve-se um total de xx pontos, que corresponde a aproximadamente 70%. Convém ressaltar que considerou-se os pontos localizados a uma distância de até 42 m do pixel “verdadeiro”, haja vista a precisão cartográfica da imagem Landsat, que é a aproximação desse número (42,426 m).

Convém ressaltar que, a análise estatística simples dos dados resultantes das técnicas de PDI também permitiram a comparação do comportamento espectral das classes definidas no início (1-Itabirito, 2-Quartzito, 3-Solo, 4-Outros). Os gráficos representados na *Figura 27* refletem a diferença ou semelhança espectral das substâncias nas diversas bandas:



**Figura 27** – Gráficos de representação do comportamento espectral de cada substância para as técnicas aplicadas.

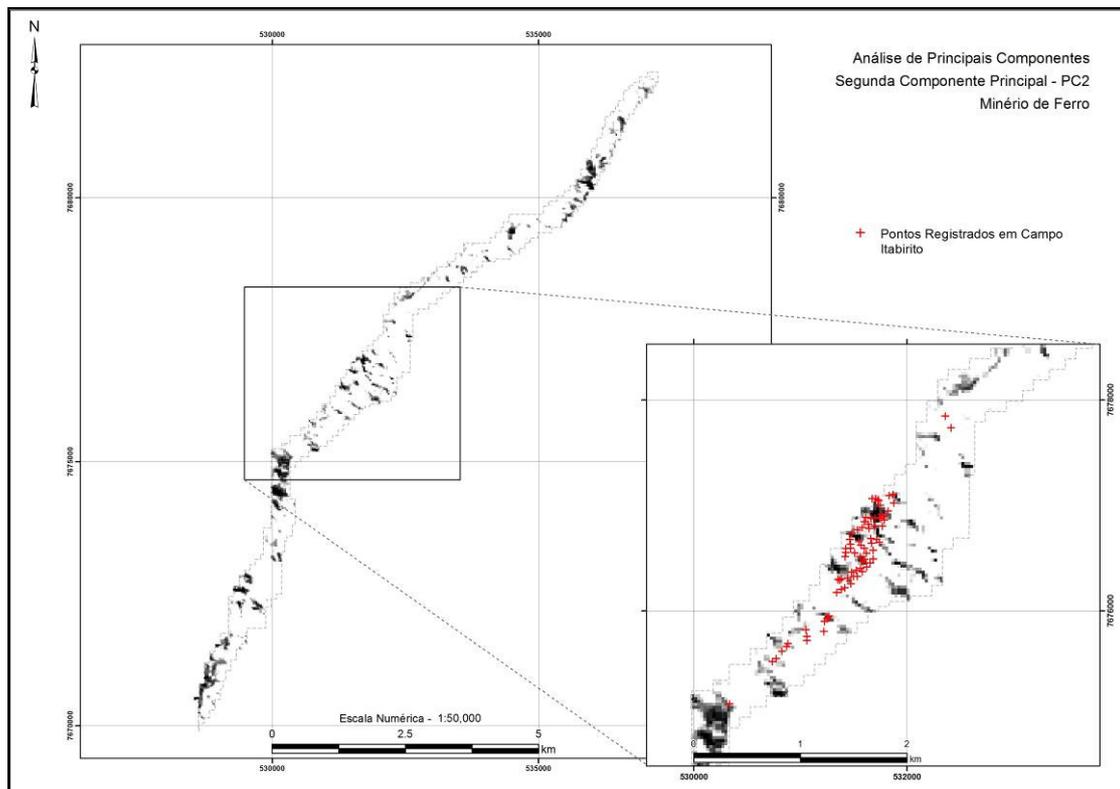
A partir dos dados apresentados, percebe-se que a substância que melhor se diferencia das demais é o quartzito, facilitando sua identificação durante a análise das imagens. Enquanto o Itabirito fica melhor caracterizado na Razão 3/1 e componente principal PC2. Isso se deve ao fato de que os óxidos/ hidróxidos de ferro são bem realçados na Razão 3/1, que correspondem às bandas de valores máximo e mínimo para essa substância (conforme representado na *Figura 28* da curva espectral para os hidróxidos de ferro).



**Figura 28** - Curva espectral representativa do hidróxido de ferro (extraído da biblioteca espectral da USGS - U.S. Geological Survey - <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>)

Quanto ao PC2, é a banda que corresponde aos valores mais representativos da análise dos principais componentes. Isso porque a PC1 resultante contém a informação que é comum a todas as bandas, como sombreamento topográfico e albedo, enquanto a PC2 apresenta a informação mais relevante na análise: os compostos de ferro, que corresponde ao contraste espectral entre as bandas 1, 2 e 3 utilizadas (ZACCHI, 2010).

A *Figura 29*, a seguir, mostra o resultado da análise de principais componentes para a PC2 (segunda componente principal). Em destaque, a coincidência dos resultados com os pontos coletados em campo, correspondentes ao itabirito.



**Figura 29** - Representação da PC2 resultante da análise de componentes principais - validação da informação destacada sobre a qual situam-se os pontos coletados em campo e referentes ao minério de itabirito.

## **5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A presença de óxidos/ hidróxidos de ferro em superfície foi diagnosticada pelas técnicas aplicadas, embora trate-se de uma área com espesso manto de intemperismo e cobertura vegetal, que constituem barreira à observação direta de litologias e jazimentos minerais. E, além disso, considerando-se as limitações do sensor TM em termos de resolução espacial. O resultado mostrou-se bastante satisfatório, pois a classificação dos dados apontou uma grande porcentagem dos pontos coletados em campo, referentes ao itabirito, que correspondem espacialmente aos pixels com valor verdadeiro (1) para ferro (cerca de 70% dos pontos).

O estudo confirmou ainda a relevância do uso das técnicas empregadas, sobretudo aquelas mais recomendadas para minério de ferro (razão das bandas 3/1 e análise de principais componentes) no decorrer das práticas de prospecção, permitindo a delimitação de áreas como alvos de estudos mais detalhados na identificação de possíveis depósitos minerais.

Pesquisas mais elaboradas poderão ser desenvolvidas futuramente, com a intenção de aplicar outras técnicas sugeridas pela literatura e criar bibliotecas espectrais mais fiéis às características dos minerais de interesse, favorecendo a eficácia da análise.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. Folhas SE.23 – Belo Horizonte e SF.23 – Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>> Acesso em 26 de Outubro de 2011.

CRA - Conestoga-Rovers e Associados Engenharia Ltda. Estudo de Impacto Ambiental: Projeto Bom Sucesso. Bom Sucesso, MG. 2010.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. *Iniciação em Sensoriamento Remoto*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 2ª Edição.

FOLLADOR, Marco. *A Caracterização Mineral pelo Sensoriamento Remoto*. Belo Horizonte: UFMG, 2004. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/>> Acessado em: 20 de Outubro de 2011.

FONSECA, Leila Maria Garcia. *Processamento Digital de Imagens*. Notas de aulas da disciplina de PDI nos programas de pós-graduação dos cursos de Sensoriamento Remoto e Computação Aplicada. INPE, 2000. 6: pag 72-90.

JESUS, Carlos Antônio Gonçalves de. *Sumário Mineral – Volume 29*. DNPM, 2010. pag 99-116.

JENSEN, John R. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres*. Tradução: José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador). [et al.]. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 14: pag 511-572

LIMA, Venissa de Souza. *Assinaturas Espectrais de Gossans Associados a Mineralizações de Pb-Zn-Ba na Bacia de Irecê (BA): Um Estudo Baseado em Dados dos Sensores TM e ASTER*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Unicamp. 2003.

MAROCO, João. *Análise Estatística com Utilização do SPSS*. Edições Silabo, 2ª Edição. São Paulo: 2003. 9: pag 229-257.

MINGOTI, Sueli Aparecida. *Análise de Dados Através de Métodos de Estatística Multivariada – Uma Abordagem Aplicada*. UFMG, 1ª Edição. Belo Horizonte: 2005. 3: pag 59-97.

MMX Mineração e Metálicos S.A. *Geologia e Trabalhos de Pesquisa Realizados na Serra de Bom Sucesso – MG*. Relatório Técnico. Belo Horizonte: 2009.

NERI, Marcos Eduardo Nilton Vieira. *As Formações Ferríferas Bandadas Ricas em Magnetita da Serra de Bom Sucesso – MG, Extremo Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero*. Relatório Técnico, FUNDEP – UFMG. 2011.

PEREIRA, Ronaldo Mello. *Fundamentos de Prospecção Mineral*. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PERROTA, Mônica Mazzini. *Processamento Digital Básico de Imagens de Sensores Remotos Ópticos para Uso em Mapeamento Geológico*. Tutorial, CPRM. 2005.

QUÉMÉNEUR, Joël Jean Gabriel. RIBEIRO, André. TROUW, Rudolph A. J.. PACIULLO, Fábio V. P.. HEILBRON, Monica. *Geologia da Folha de Lavras*. Belo Horizonte: COMIG, 2002.

REIS, Elpídio. BICHO, Cristina. MELO, Eduardo. *Exploração Mineral: Tendências Tecnológicas*. Rio de Janeiro: CETEM/ CPRM, 2006.

SULSOFT. *Guia do Envi em Português*. Disponível em: <<http://www.envi.com.br/index.php?link=Downloads>> Acesso em: 20 de Outubro de 2011.

ZACCHI, Ériko Natal Pedro. SILVA, Adalene Moreira. ROLIM, Vassily Khoury. *Análise Integrada de Dados Multifonte e sua Aplicação no Mapeamento Geológico das Formações Ferríferas da Serra de Itapanhoacanga, Alvorada de Minas, MG*. RBGf (Revista Brasileira de Geofísica). 643-656, 2010.