



Número: 380 / 2007  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

**PAULO RODRIGO GAIOTTI SIMÕES**

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE AMBIENTES CÁRSTICOS  
ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO E SIG:  
O CASO DO PARQUE NACIONAL CAVERNAS DO PERUAÇU -  
JANUÁRIA / ITACARAMBI, MG**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências  
como parte dos requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Geociências

**Orientador:** Prof. Dr. Alvaro P. Crósta  
**Co-orientador:** Prof. Dr. Ivo Karmann

CAMPINAS - SÃO PAULO

Agosto de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA CENTRAL DA UNICAMP

Bibliotecário: Helena Joana Flipsen – CRB-8ª / 5283

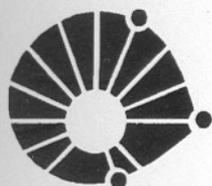
Si51c

Simões, Paulo Rodrigo Gaiotti.

Caracterização física de ambientes cársticos através de sensoriamento remoto e SIG : o caso do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu - Januária / Itacarambi, MG / Paulo Rodrigo Gaiotti Simões. — Campinas, SP : [s.n.], 2007.

Orientadores: Álvaro Penteadó Crósta, Ivo Karmann.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Espeleologia. 2. Carste. 3. Sistemas de informação geográfica. 4. Sensoriamento remoto. I. Crósta, Alvaro Penteadó. II. Karmann, Ivo. III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**AUTOR: PAULO RODRIGO GAIOTTI SIMÕES**

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE AMBIENTES CÁRSTICOS ATRAVÉS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO E SIG: O CASO DO PARQUE NACIONAL  
CAVERNAS DO PERUAÇU - JANUÁRIA / ITACARAMBI, MG**

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Alvaro Penteadó Crósta

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. Ivo Karmann.

Aprovada em 06/08/07

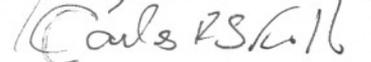
**EXAMINADORES:**

Prof. Dr. Alvaro Penteadó Crósta

Prof. Dr. Luis Beethoven Piló

Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho

  
\_\_\_\_\_  
- Presidente

  
\_\_\_\_\_  
  
\_\_\_\_\_

Campinas, 06 de agosto de 2007

**A DOG WITH NO COLLAR**

**S. Goldring**

***Sightless am I, cadaver born.  
By critics pen my task is torn.  
Remnants that once were principles  
Now but rags in a paupers tomb.***

*Dedico este trabalho à minha Tia Nedir, pelo amor e  
apoio incondicionais  
À memória do meu Pai  
À minha avó Percília, que próxima ao seu centenário,  
é o mais belo exemplo de perseverança  
Ao meu Tio Nilton e à prima Denise  
Às minhas irmãs Simone e Liliane  
À Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE,  
início da jornada no mundo das Geociências.*

## AGRADECIMENTOS

---

*Agradeço ao Prof. Alvaro, por ter acreditado, apostado e orientado esta pesquisa. Aos professores Carlos Roberto e Ivo Karmann, pelo auxílio indispensável.*

*À UNICAMP, pelo ensino público, gratuito e de qualidade. Ao LAPIG pelo apoio logístico no processamento dos dados e ambiente de troca de informações e experiências.*

*À CAPES, pela cessão da bolsa de estudos, sem a qual esse trabalho não teria sido possível.*

*À UFOP, UFPe e UESPI, pela minha formação acadêmica básica.*

*À Dra. Niède Guidon e Dra. Anne-Marie Pessis pela oportunidade de inserção no mundo arqueológico; ao mestre Marcelo Souza, pelo que representou na minha formação pessoal, tecnológica e geotecnológica.*

*Às cidades de Ouro Preto e Mariana e às Repúblicas Federais da UFOP (Rocinha, Casablanca, Sparta, Rebu, Bem Na Boca, Marragolo, Patotinha, Maracangalha, Virada Pra Lua, Reino de Baco, Arca de Noé, Taqueupa, Sem Saída (R.I.P.)), pela receptividade e pela parte social.*

*À Lika, com quem estive no céu e no inferno.*

*Ao Claudão, guru espiritual e espeleológico da S.E.E., pela lição de vida que representa, e por ter, generosamente, compartilhado comigo a Geoespeleologia e a Teoria da Complexidade.*

*Aos inumeráveis amigos que fiz em OP e Mariana: Marcão, Fabiana, Ariane, Gandhi, Zé Carioca, Nádegas, Carioca, Bart e Claudinha, Tatilama, Seqüela, Tonicão, Toniquinho, Miltinho e Luciana, Tina, Pedro o Podre, Crusoé, Durant, Zé Eduardo, Gersinho e Andrea, Sobrenatural, Oxi, Marcelinho, Diet, Tékus, Nakapa, Sabão, Kaskão, Zé Pereira, Zuza, Ligeirinho, Xiquita, Zé de Fuccio, Tati Comelli, Pétrus, Márcio Autista, Betinho, e mais uns tantos que não caberia citar aqui.*

*À Fundação Museu do Homem Americano – FUMDHAM (onde nunca havia rotina) e às pessoas maravilhosas com quem trabalhei: Sr. Joãozinho, D. Edith e as crianças, Dioclécio e Pedrinho, Sr. Nivaldo e D. Carmelita, Pedrina, Zé Alves, Aurélio, Jorlan, Eliete e Cida, Júnior, Wagner, Elaine, Girleide, Rosa, Ideni, Vânia, Irma, Mike, Fábio Parenti, Claude e Martine, Conceição Lage, Gisele, Sr. Chico, Marcelo Gênio, Fátima Luz.*

*À galera de São Raimundo Nonato: Mário Filho, Jorlan, Maurição, Gildo,*

## AGRADECIMENTOS

---

*Jucy, à galera do Motocross. Ao memorável bode assado do Tanga, e à mulherada daquela terra quente, foi um imenso prazer.*

*À Praça da Paz, por ter fornecido sossego suficiente para as longas reflexões.*

*À Escola de Altos e Autos Estudos Pandisciplinares Capixabas.*

*Aos amigos da UNIP: Bocci, Márcia, Pacheco, Lílian, Tadeuz, Wagnão.*

*À Carol, pelo bom astral e simpatia, que resultou numa bela convivência; ao Juca, Eduin, Chicão, Lucíola, por terem compartilhado o espaço e as contas da casa.*

*À Super Val e Edinalva da SPG, pela “eficiência e presteza”.*

*Aos amigos da UFPE e do Recife: Raoni, Manoel, Fábio, Crenivaldo, Dário (Lobotômato), Rossana, D. Emília, Luciana e Augusto, Ricardão (in memoriam) e ao Prof. Luciano Cerqueira.*

*À galera do IG e do LAPIG: Porpeta, Sebastião, Gustavo, Oderson, Lobinho, Lucíola, César, Fritz, Veri, Osvaldinho, Ricardinho, Rodrigo, Lucas, Serjão, Aloísio, Sandra, Sr. Aníbal, pela convivência agradável que diminuiu o stress rotineiro.*

*Ao Tissoka, quem muito me estimulou na S.E.E. e me apresentou ao IG, anos após.*

*À minha prima Graciella e à Rosane, pelo feliz reencontro após décadas.*

*Ao Roberto, que recuperou os dados do meu HD.*

*Ao Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas – GBPE, pela cessão dos mapas espeleológicos e ortofotos. Ao prof. Philippe Maillard pela cessão das cartas topográficas.*

*Ao Flávio Túlio e Danilo, funcionários do PNCP, pelo suporte à época dos trabalhos de campo, incentivo e cessão do Plano de Manejo.*

*À Eterna, grande amiga e defensora do vale do Peruaçu.*

*Ao bom e velho Rock’n’Roll, motivo de muita inspiração.*

*À comunidade espeleológica, na esperança que este trabalho seja um retorno à altura.*

*E a todos que direta ou indiretamente contribuíram, incentivaram ou apoiaram o desenvolvimento deste trabalho. Minhas mais sinceras desculpas pelas omissões.*

# SUMÁRIO

Páginas preliminares . . . . .	i
Dedicatória . . . . .	v
Agradecimentos . . . . .	vi
Sumário . . . . .	viii
Lista de Figuras . . . . .	xi
Lista de Gráficos . . . . .	xiii
Siglas . . . . .	xiv
Resumo . . . . .	xv
Abstract . . . . .	xvi

---

## **CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO**

1.1 - APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 - OBJETIVOS .....	1
1.3 - BASES DE DADOS .....	2
1.3.1 - BIBLIOGRAFIA .....	2
1.3.2 - DADOS CADASTRAIS .....	3
1.3.3 - ARQUIVOS EM FORMATO MATRICIAL .....	3
1.3.4 – ARQUIVOS EM FORMATO VETORIAL .....	4
1.3.5 - REGISTRO FOTOGRÁFICO .....	4
1.4 – ETAPAS DE TRABALHO .....	4
1.4.1 - COMPILAÇÃO DE DADOS .....	5
1.4.2 - INTEGRAÇÃO DE DADOS .....	5
1.4.3 - TRABALHOS DE CAMPO .....	6
1.4.4 - ANÁLISE DE DADOS .....	7
1.5 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	9

## **CAPÍTULO 2: A ÁREA DE ESTUDO**

2.1 - INTRODUÇÃO .....	11
2.1.1 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO .....	11
2.1.2 - LIMITES DA UNIDADE DE CONSERVAÇÃO .....	12

2.2 - ASPECTOS DO MEIO FÍSICO .....	12
2.2.1 - CLIMA .....	12
2.2.2 - GEOLOGIA .....	13
2.2.3 - RECURSOS MINERAIS .....	18
2.2.4 - GEOMORFOLOGIA E HIDROLOGIA .....	19
2.2.5 - ESPELEOLOGIA .....	21
2.3 - ASPECTOS DO MEIO BIÓTICO .....	26
2.3.1 - COBERTURA VEGETAL .....	26
2.3.2 - PALEONTOLOGIA .....	28
2.4 - ASPECTOS DO MEIO ANTRÓPICO .....	28
2.4.1 - A OCUPAÇÃO PRÉ-HISTÓRICA .....	28

### **CAPÍTULO 3: SENSORIAMENTO REMOTO**

3.1 - INTRODUÇÃO .....	32
3.2 - O PROGRAMA LANDSAT .....	33
3.3 - O SENSOR ASTER .....	34
3.4 - OS DADOS SRTM .....	35
3.5 - AS ORTOFOTOCARTAS .....	36
3.6 - ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA .....	37
3.6.1 - INTRODUÇÃO .....	37
3.6.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE MINERAIS E ROCHAS .....	38
3.6.3 - MÉTODOS .....	40
3.6.4 - DESC. MACROSCÓPICA E INTERPRETAÇÃO ESPECTRO-MINERALÓGICA.....	42
3.7 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS: VNIR E SWIR.....	52
3.7.1 - INTRODUÇÃO .....	52
3.7.2 - PRÉ-PROCESSAMENTO .....	53
3.7.2.1 - CORREÇÃO ATMOSFÉRICA .....	53
3.7.2.2 - CORREÇÃO GEOMÉTRICA .....	54
3.7.3 - TRANSFORMAÇÕES E REALCES ESPECTRAIS .....	55
3.7.4 - CLASSIFICAÇÃO ESPECTRAL - SAM.....	58
3.7.5 - TRANSFORMAÇÕES ESPACIAIS .....	61
3.8 - RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	62

## **CAPÍTULO 4: SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

4.1 - INTRODUÇÃO .....	68
4.2 - FONTES E FORMATOS DE DADOS .....	68
4.2.1 - ARQUIVOS VETORIAIS .....	68
4.2.2 - ARQUIVOS MATRICIAIS .....	70
4.3 - CARTOGRAFIA DIGITAL .....	70
4.4 - MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDE) .....	71
4.5 - ANÁLISES ESPACIAIS E ESTATÍSTICAS .....	74
4.5.1 - GEOLOGIA .....	74
4.5.2 - GEOMORFOLOGIA .....	77
4.5.3 - HIDROGRAFIA .....	81
4.5.4 - ESPELEOLOGIA .....	85
4.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	89

## **CAPÍTULO 5: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO**

5.1 - INTRODUÇÃO .....	88
5.2 - GEOLOGIA .....	88
5.3 - GEOMORFOLOGIA .....	90
5.4 - HIDROGRAFIA .....	93
5.5 - ESPELEOLOGIA .....	95

## **CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES .....**

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Fluxograma dos principais procedimentos nas atividades de SIG e SR .....	8
Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo e acesso ao PNCP .....	12
Figura 2.2 - Mapa geológico da região do PNCP sobre modelo SRTM .....	14
Figura 2.3: Vista dos calcários do Grupo Bambuí na serra do Cardoso das Minas .....	16
Figura 2.4: Vista do <i>poljê</i> da Terra Brava, com o acesso à entrada da Gruta Janelão .....	19
Figura 2.5 - Mapa da compartimentação geomorfológica sobre MDE .....	21
Figura 2.6 - Mapa de distribuição da cavernas e sítios arqueológicos na região do PNCP .....	22
Figura 2.7: Vista da entrada e primeira clarabóia da Gruta Janelão .....	23
Figura 2.8: Vista da Dolina dos Macacos do interior da Gruta Janelão .....	24
Figura 2.9: Vista da entrada da Gruta Bonita .....	24
Figura 2.10: Vista do rio Peruaçu no interior da Gruta Janelão .....	25
Figura 2.11: Vista da entrada e escavação da Lapa do Boquete .....	29
Figura 2.12: Vista em detalhe da escavação da Lapa do Boquete .....	29
Figura 2.13: Detalhe de painel de pinturas rupestres próximo à Gruta Janelão .....	32
Figura 2.14: Detalhe das pinturas rupestres da Gruta do Caboclo .....	32
Figura 3.1: Espectros de calcário calcítico e dolomítico, dolomita e calcita .....	39
Figura 3.2: Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P50 .....	42
Figura 3.3: Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P21 .....	43
Figura 3.4: Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P20 .....	44
Figura 3.5: Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P23 .....	45
Figura 3.6: Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P14 .....	46
Figura 3.7: Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P15 .....	47
Figura 3.8: Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P30 .....	48
Figura 3.9: Espectros de amostra de calcário dolomítico do ponto P34 .....	49

Figura 3.10: Espectros de amostra de calcário dolomítico do ponto P12 .....	50
Figura 3.11: Espectros de amostra de calcário dolomítico do ponto P10 .....	51
Figura 3.12: Detalhamento da coluna estratigráfica a partir da interpretação espectro-mineralógica ...	52
Figura 3.13: Detalhe das composições coloridas do sensor ETM+ .....	56
Figura 3.14: Detalhe das composições coloridas do sensor ASTER .....	56
Figura 3.15: Composição colorida ASTER com aumento de contraste e transformação HSI ...	56
Figura 3.16: Índices de Vegetação (NDVI) gerado sobre imagem ETM+ e ASTER .....	58
Figura 3.17: Detalhe da Classificação SAM sobre cena ASTER .....	60
Figura 3.18: Filtragens Direcionais sobre MDE.....	61
Figura 3.19: Comparação entre os espectros de calcário calcítico e calcário dolomítico .....	65
Figura 4.1: Processo de geração do MDE a partir do mosaico de ortofotos .....	70
Figura 4.2: Processo de geração do MDE da área de estudo a partir dos dados SRTM .....	71
Figura 4.3: Mapa de classificação de calcários calcíticos e dolomíticos com a técnica SAM .....	73
Figura 4.4: Diagrama de roseta dos lineamentos extraídos sobre MDE e imagem Landsat7 ....	74
Figura 4.5: Mapa da compartimentação geomorfológica e distribuição das dolinas .....	76
Figura 4.6: Histograma de distribuição da freqüência dos dados altimétricos a partir de MDE ...	76
Figura 4.7: Mapa de declividade diferenciando as toposeqüências a partir de 5 classes .....	78
Figura 4.8: Mapa da Bacia do rio Peruaçu e padrão de drenagem sobre MDE .....	82
Figura 4.9: Mapa de distribuição das plantas das cavernas sobre banda do Landsat 7 .....	84
Figura 4.10: Diagrama de roseta dos lineamentos dos mapas de cavernas e regionais .....	85
Figura 4.11: Mapa de distribuição das cavernas e áreas de maior potencial espeleológico .....	86
Figura 5.1: Distribuição de dolinas e lineamentos sobre compartimentos geomorfológicos .....	92
Figura 5.2: Quadro de classificação de padrões de drenagens.....	95
Figura 5.3: Lineamentos sobre plantas baixas das principais cavernas do PNCP .....	97

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Porcentagens das litologias da área de estudo e situação do carste .....	72
Gráfico 4.2: Porcentagens das áreas dos compartimentos geomorfológicos .....	77
Gráfico 4.3: Porcentagem de distribuição de dolinas sobre compartimentos geomorfológicos...	79

## SIGLAS

**ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica

**APA** - Área de Proteção Ambiental

**ASTER** – *Advanced Thermal Emission and Reflection Radiometer*

**B.P.** - *Before Present*

**CNC** – Cadastro Nacional de Cavidades

**CECAV** – Centro de Estudos, Proteção e Manejo de Cavernas

**CPRM** – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

**DNPM** – Departamento Nacional de Produção Mineral

**DSG** - Diretoria de Serviço Geográfico

**ETM+** - *Enhanced Thematic Mapper Plus*

**FIAT** - FIAT Automóveis

**GPS** – *Global Positioning System*

**IBAMA** - Instituto Brasileiro de Meio-Ambiente e Recursos Renováveis

**IG/UNICAMP** – Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas

**LAPIG** – Laboratório de Processamento de Informações Geo-referenciadas

**MDE**– Modelo Digital de Elevação

**NASA** – *National Aeronautics and Space Administration*

**PNCP** – Parque Nacional Cavernas do Peruaçu

**SAM** – *Spectral Angle Mapper*

**SBE** – Sociedade Brasileira de Espeleologia

**SEE** – Sociedade Excursionista e Espeleológica

**SIE** – Sistema de Informações Espeleológicas

**SIG** – Sistema de Informações Geográficas

**SIGEP** – Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos

**SR** – Sensoriamento Remoto

**SRTM** - *Shuttle Radar Topography Mapping*

**UC** – Unidade de Conservação

**UFMG** - Universidade Federal de Minas Gerais

**UFOP** – Universidade Federal de Ouro Preto

**USGS** – *United States Geological Survey*



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOTECNOLOGIAS

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE AMBIENTES CÁRSTICOS  
ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO E SIG:  
O CASO DO PARQUE NACIONAL CAVERNAS DO PERUAÇU -  
JANUÁRIA / ITACARAMBI, MG**

**RESUMO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Paulo Rodrigo Gaiotti Simões**

Este trabalho aborda a caracterização do meio físico em ambientes cársticos com o emprego de técnicas de sensoriamento remoto e SIG, tomando como exemplo o Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, municípios de Januária e Itacarambi, MG. A escolha desta área se deveu à alta relevância da região em termos de seu conteúdo espeleológico, arqueológico, geomorfológico e biótico, sendo uma das mais importantes e expressivas áreas cársticas do Brasil. Para atingir o objetivo desta pesquisa, foram enfocados aspectos do meio físico, tais como geologia, geomorfologia, hidrografia e espeleologia. As técnicas de sensoriamento remoto utilizadas incluíram a espectroscopia de reflectância, voltada à análise qualitativa de amostras de carbonatos, e o processamento digital de imagens multiespectrais geradas por sensores orbitais, incluindo a geração e análise de composições coloridas, índice de vegetação, transformações e realces espectrais e classificações espectrais de elementos da superfície, tendo resultado em discriminações litológicas, litofaciológicas e de comunidades vegetais. A modelagem espacial de vários atributos geográficos da área de estudo foi realizada por meio de técnicas de SIG com o objetivo de analisar de forma integrada dados de fontes e formatos diversos, calcular parâmetros morfométricos, refinar mapas pré-existentes, produzir modelos tridimensionais realísticos, realizar análises espaciais e, por fim, gerar um mapa de potencial espeleológico, este último com a finalidade de servir de orientação a futuros trabalhos de exploração em campo. Foram analisados e discutidos os resultados e as limitações encontradas, no que tange a procedimentos empregados e características dos dados utilizados, como as imagens de sensoriamento remoto. O uso conjunto dessas geotecnologias atendeu aos objetivos propostos, demonstrando como o uso dessas ferramentas pode contribuir para diminuir a subjetividade das análises, proporcionando uma descrição quantitativa de elementos do ambiente cárstico, complementar aos estudos qualitativos existentes.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS  
ÁREA DE GEOTECNOLOGIAS

**CHARACTERIZATION OF KARSTIC ENVIRONMENTS BY MEANS OF  
REMOTE SENSING AND GIS: THE CASE OF CAVERNAS DO  
PERUAÇU NATIONAL PARK, JANUÁRIA/ITACARAMBI,  
MINAS GERAIS STATE, BRAZIL**

**ABSTRACT**

**MASTER DISSERTATION**

**Paulo Rodrigo Gaiotti Simões**

This dissertation deals with the characterization of karstic environments through the use of remote sensing and GIS techniques, using as a case study the Cavernas do Peruaçu National Park, located in Januária and Itacarambi counties, Minas Gerais State, Brazil. The selection of this area was due to its relevance in terms of the speleological, archeological, geomorphological and biotic contents, representing one of the most important karstic areas in Brazil. Aspects such as geology, geomorphology, hydrography and speleology were considered in the analysis of the physical environment of the study area. Remote sensing techniques comprised reflectance spectroscopy, used for the quantitative analysis of carbonate rocks, and digital image processing applied to imagery acquired by spaceborne sensors, including color composites, vegetation index, spectral enhancement and transforms and spectral classification of surface targets which resulted in lithologic, lithofaciologic and vegetation communities discrimination. Spatial modeling of geographic attributes was carried out by means of GIS techniques aiming to analyze multi-source map and image data, to calculate morphometric parameters, to refine pre-existing map, to produce realistic three-dimensional models, to perform spatial analysis and, finally, to generate a map of the speleological potential, this latter with the purpose to orientate future exploration surveys in the field. Results and constraints were analyzed and discussed with respect to the procedures employed and the characteristics of the data employed, such as remote sensing imagery. The joint use of geotechnologies met the proposed objectives, demonstrating how the use of these tools may contribute to diminish the subjectivity of the analysis, allowing quantitative descriptions of karstic environments, complementing existing qualitative studies.

# ***CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO***

---

## **1.1 – APRESENTAÇÃO**

Esta dissertação de mestrado apresenta os resultados da pesquisa realizada com o propósito de aplicar Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e de Sensoriamento Remoto (SR) como ferramentas voltadas à caracterização de aspectos do meio físico de áreas cársticas em rochas carbonáticas.

A opção por esta temática se fez em razão de êxitos obtidos com a aplicação de SIG e SR em trabalhos geológicos e ambientais, bem como à quase ausência de aplicações de Geotecnologias em levantamentos espeleológicos.

Para a realização desta pesquisa tomou-se como área de estudo a região do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu (PNCP), municípios de Januária e Itacarambi, MG. A escolha dessa área justifica-se pela alta relevância da região em termos do conteúdo espeleológico, arqueológico, geomorfológico, biótico e sua situação atual enquanto Unidade de Conservação, em vias de ser aberta à visitação pública.

Espera-se que este trabalho resulte em um instrumento de pesquisa que auxilie na tomada de decisões e na execução de procedimentos, por parte da administração do PNCP, previstos no Plano de Manejo desta UC. Por outro lado, pretende-se que esta pesquisa venha divulgar e estimular a utilização das Geotecnologias junto à comunidade espeleológica, servindo como um roteiro metodológico básico.

## **1.2 – OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho consiste na caracterização de ambientes cársticos através da aplicação de procedimentos próprios de Sistemas de Informações Geográficas - SIG e de Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto – PDI. Esta caracterização pressupõe análises sobre aspectos particulares da região, como geologia, geomorfologia, hidrografia, fitofisiografias e espeleologia.

Para se alcançar o objetivo geral, foram executados procedimentos específicos voltados ao processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, classificações espectrais, espectroscopia de reflectância, distribuições espaciais de dados espeleológicos, análises morfométricas, tratamento de dados de campo e geração de modelos tridimensionais.

Estes procedimentos foram aplicados à região do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu – PNCP, localizado nos municípios de Januária, Itacarambi e São João das Missões.

Em suma, pretendeu-se gerar um instrumento operacional que desse suporte ao processo de tomada de decisão pelos funcionários do IBAMA no que se refere à continuidade dos levantamentos espeleológicos e operacionalização das resoluções definidas no Plano de Manejo do PNCP.

## **1.3- BASES DE DADOS**

### **1.3.1 – BIBLIOGRAFIA**

O material bibliográfico utilizado referente à área de estudo é constituído por diversos artigos publicados em revistas especializadas (Revista Espeleologia, Revista O Carste), anais de congressos (Congresso Brasileiro de Espeleologia, Encontro Brasileiro de Estudos Sobre o Carste), relatórios e livros. Esse material foi levantado junto à biblioteca da Sociedade Excursionista Espeleológica – SEE, biblioteca do IG/UNICAMP ou através da Internet, além de dissertações de mestrado.

De fundamental importância para a caracterização da Unidade de Conservação foi o Plano de Manejo do PNCP, incluindo seus anexos e arquivos cartográficos digitais, disponibilizados pela administração do PNCP.

Plano de Manejo é o documento de planejamento que tem por finalidade orientar a unidade de Conservação para uma gestão e operacionalização mais eficientes, incluindo-se aí atividades voltadas ao ordenamento da visitação pública, indicações de manejo dos recursos naturais e controles ambientais (Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000). Este Plano de Manejo foi executado com recursos conforme acordo de compensação ambiental firmado entre o Ministério Público Federal e a FIAT Automóveis, sendo o Instituto Brasileiro de Meio-Ambiente e Recursos Renováveis – IBAMA a instituição interveniente no processo.

### 1.3.2 - DADOS CADASTRAIS

Os dados cadastrais foram levantados junto ao Cadastro Nacional de Cavidades – CNC, mantido pela Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE, ao CODEX, cadastro de cavidades mantido pela REDESPELEO, ao Sistema de Informações Espeleológicas – SIE (Simões *et al.* 2002), mantido pela SEE e pelo Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, mantido pelo Centro de Estudos, Proteção e Manejo de Cavernas – CECAV/IBAMA, além das revistas especializadas já citadas.

Estas fontes permitiram reunir registros de 168 cavidades e sítios arqueológicos dentro dos limites do Parque e adjacências, com grau variado de acurácia no posicionamento, ou mesmo com ausência de coordenadas.

### 1.3.3 - ARQUIVOS EM FORMATO MATRICIAL

Os arquivos de imagens raster utilizados são de fontes, natureza e escalas diversas. Este conjunto é constituído por mapas temáticos de geologia, geomorfologia, fitofisiografias, uso e ocupação do solo (RADAM 1980, IBAMA 2005) e um mosaico de oito ortofotocartas (RURALMINAS 1990) em escala 1:10.000, que recobre o cânion principal do rio Peruaçu e adjacências. Foram utilizadas também cartas topográficas em escala de 1:100.000, compostas pela Diretoria de Serviço Geográfico – DSG, do Ministério do Exército, folhas Januária (SD.23-Z-C-II) e Japoré (SD.23-Z-A-V).

Foram utilizadas imagens multiespectrais de sensores remotos orbitais ASTER (*Advanced Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e Landsat7 ETM+<sup>1</sup> (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), órbita 219, ponto 70, adquiridas respectivamente em 17 de abril de 2001 e em 21 de setembro de 2000 e com resolução espacial de 15 e 30 m.

Além das imagens multiespectrais, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação – MDE gerado por interferometria por radar, proveniente do *Shuttle Radar Topography Mapping* – SRTM<sup>2</sup>, levantamento topográfico efetuado entre 11 e 22 de fevereiro de 2000 a bordo do ônibus espacial Endeavour, com resolução espacial de 90 m.

#### 1.3.4 – ARQUIVOS EM FORMATO VETORIAL

O conjunto de arquivos vetoriais, composto de arquivos de pontos, linhas e polígonos, inclui plantas baixas das cavidades, mapas temáticos de geologia (IBAMA 2005, CPRM 2001), geomorfologia, hidrografia (ANEEL 2001), curvas de nível com equidistância de 10 m, provenientes das ortofotocartas (RURALMINAS 1990) e com 25 m, provenientes dos dados SRTM (NASA 2002), limites das UC's e da Reserva Indígena Xacriabá e malha viária (IBAMA 2005).

De caráter mais regional, abrangendo o Estado de Minas Gerais e mesmo o Brasil, há os arquivos de divisão administrativa, limites políticos e sede municipal, hidrografia, malha viária, hipsometria, vegetação, geologia, solos, Unidades de Conservação Federais<sup>3</sup> (IBAMA 2005, CPRM 2001, ANEEL 2001), além da base de dados de ocorrências minerais disponibilizada pela CPRM (2001).

A partir dos levantamentos de campo, foram produzidos arquivos de caminhamentos, pontos descritos, pontos de coleta e pontos notáveis, levantados em campo com GPS Garmin Etrex.

#### 1.3.5 - REGISTRO FOTOGRÁFICO

Durante a campanha de campo realizada em janeiro de 2006, foram feitas cerca de 700 fotos digitais de feições geomorfológicas representativas, bocas e interior de cavidades, pontos de coleta, registros gráficos em sítios arqueológicos e aspectos fitofisiográficos.

Foram realizados alguns registros fotográficos sistemáticos para a confecção de mosaicos do contexto paisagístico natural.

### **1.4 – ETAPAS DE TRABALHO**

O desenvolvimento desta pesquisa se deu a partir de três fases, sendo uma conceitual, uma operacional e uma interpretativa. Na primeira fase se deu a formulação e elaboração do projeto de pesquisa, contendo a definição do objeto de estudo e dos métodos empregados, utilizando-se de uma determinada área para sua aplicação. Numa segunda fase, operacional, foram adotados

procedimentos para aquisição dos dados, processamento das informações e verificações em campo. Por último, a fase interpretativa, quando foram analisadas as informações extraídas do conjunto de dados no ambiente SIG, das imagens de SR e dos dados de campo.

Para efeito didático, foram enumerados os procedimentos básicos das fases 2 e 3, descritos a seguir:

#### 1.4.1 - COMPILAÇÃO DE DADOS

Esta etapa consistiu de levantamentos bibliográficos, cartográficos, registros fotográficos, topografias de cavernas e dados cadastrais, tanto em mídia impressa, quanto em formato digital.

A bibliografia foi levantada em bibliotecas especializadas da Sociedade Brasileira de Espeleologia – SBE, da Sociedade Excursionista e Espeleológica – SEE e do Instituto de Geociências da UNICAMP e junto à administração do PNCP.

A cartografia em papel e digital foi reunida a partir do acervo da SEE, de solicitações ao GBPE, ao Centro de Sensoriamento Remoto da UFMG, IBAMA, CPRM, além de pesquisas em bases de dados disponíveis na Internet (Landsat7 ETM+, ANEEL, SRTM, ASTER).

Os registros fotográficos foram levantados junto ao arquivo da SEE e quando dos trabalhos de campo.

As informações sobre a topografia de cavernas foram levantadas junto à bibliografia e através de solicitações ao GBPE e à SEE.

Os dados cadastrais foram compilados junto ao Cadastro Nacional de Cavidades – CNC, ao CODEX, à bibliografia disponível e ao Sistema de Informações Espeleológicas da SEE, tendo sido obtidos também através de GPS, por ocasião dos trabalhos de campo.

#### 1.4.2 - INTEGRAÇÃO DE DADOS

Esta etapa se iniciou com a constituição da base cartográfica (escalas 1:250.000, 1:100.000, 1:10.000 e 1:500) e sistematização dos dados digitais em ambiente SIG. Incluiu a execução de procedimentos próprios da cartografia digital, como rasterizações, geo-referenciamento, vetorizações, reclassificações e referência espacial.

Em seguida foi constituída a base de imagens dos sensores ETM+ e ASTER, dados SRTM e as ortofotocartas. A partir desta base, foram testados procedimentos de processamento digital de imagens e selecionados os mais adequados aos objetivos da pesquisa (delimitação das exposições de carbonatos, discriminação litofaciológica, extração de lineamentos e feições geomorfológicas). Os resultados foram integrados ao ambiente SIG.

Os dados cadastrais foram compilados e passaram a integrar a base de dados espeleológicos, que inclui mapas topográficos de cavernas e sítios arqueológicos. Sua inserção no ambiente SIG proporcionou a conferência do posicionamento das ocorrências e a sobreposição dos contornos das cavidades às imagens multiespectrais, ortofotocartas ou mapas temáticos.

Foram elaborados modelos tridimensionais em perspectiva a partir da sobreposição de imagens ETM+ aos dados SRTM, assim como a partir da estereoscopia do sensor ASTER. Um modelo de altíssima resolução foi gerado a partir das ortofotocartas, cobrindo todo o cânion principal do rio Peruaçu.

Os procedimentos computacionais para realização desta pesquisa foram feitos com o suporte do Laboratório de Processamento de Informações Geo-referenciadas – LAPIG do Instituto de Geociências da UNICAMP. Foram utilizados PC's Pentium 4, 2.6 GHz, 1 Gb de memória RAM, DVD-R, *scanner*, impressoras a laser e acesso à Internet. O conjunto de aplicativos de *software* utilizado incluiu o ArcGIS 9.1 como plataforma SIG, ENVI 4.2 para o processamento digital de imagens de SR, Autocad 2005 para vetorizações, Open Office 2.0 para editoração eletrônica e Adobe Photoshop 7.0 para edição final de imagens.

#### 1.4.3 - TRABALHOS DE CAMPO

A execução de trabalhos de campo teve por finalidade a geração de dados de verdade terrestre por meio de observações, descrições, registros fotográficos, coletas e marcação de pontos e trilhas com GPS.

Considerando-se os aspectos do meio físico, procurou-se realizar observações e descrições de

---

<sup>1</sup> Disponível em <ftp://ftp.glcg.umiacs.umd.edu/glcg/Landsat/WRS2/>

<sup>2</sup> Disponível em <ftp://ftp.glcg.umiacs.umd.edu/glcg/SRTM/WRS2/>

<sup>3</sup> Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/>

caráter geológico e geomorfológico que permitissem uma melhor compreensão de aspectos do relevo, assim como características das cavidades e aspectos hidrológicos. Foram coletadas amostras de minerais, solos e rochas para eventuais análises.

A utilização de GPS visou o levantamento de pontos notáveis para a correção geométrica das imagens multiespectrais, verificação ou correção do posicionamento de cavidades, estradas e trilhas e marcação de pontos de coleta.

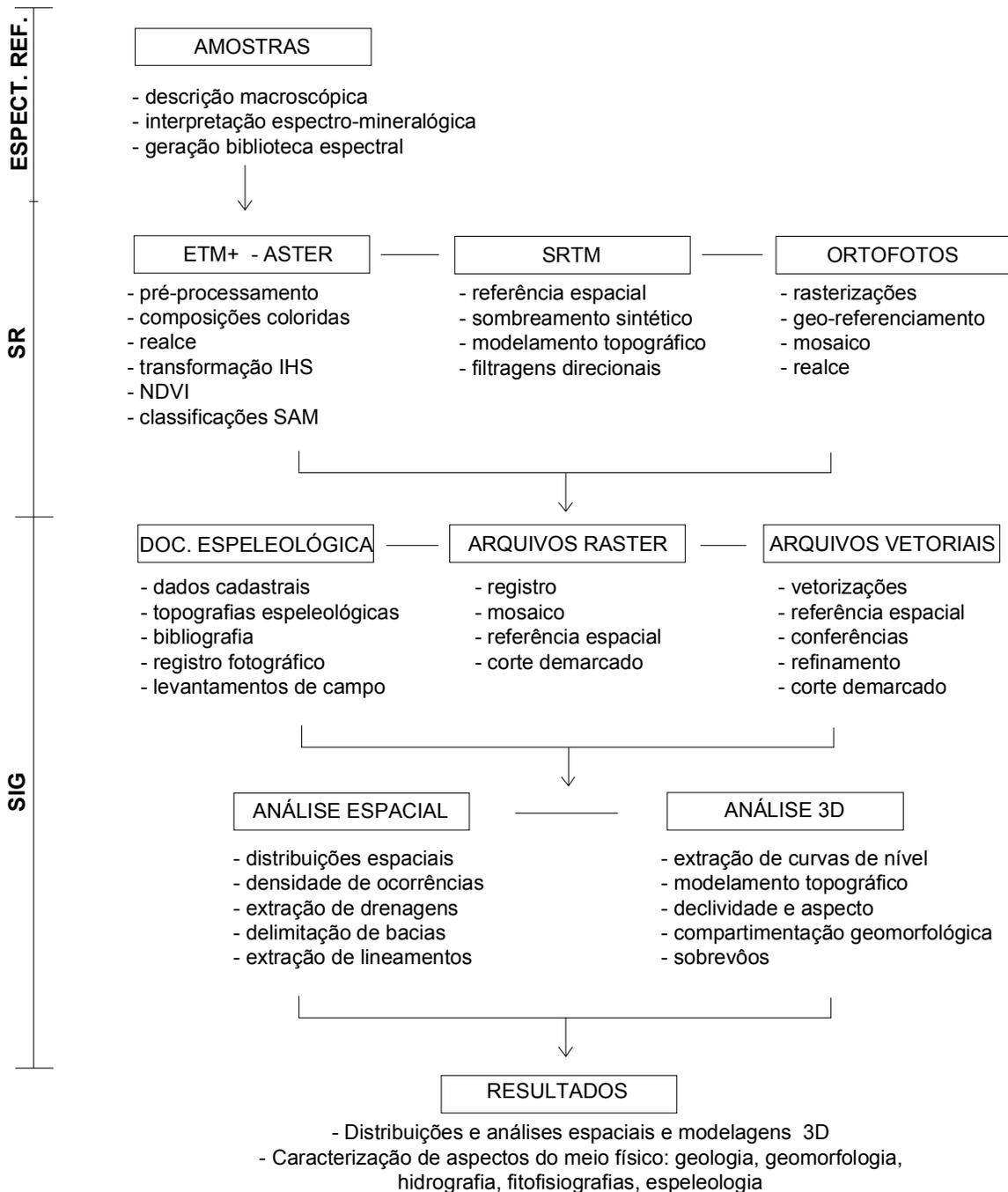
Foi realizado registro fotográfico com câmera digital de aspectos de interesse geológico, geomorfológico e fitofisiográfico, entradas e interiores de cavidades, registros gráficos e de pontos de coleta.

#### 1.4.4 - ANÁLISE DE DADOS

Nesta etapa foram realizadas análises acerca dos procedimentos técnicos e metodológicos mais adequados à conclusão dos objetivos propostos e os resultados obtidos com a sua utilização.

No âmbito do SIG, foram feitas distribuições e análises espaciais das ocorrências espeleológicas, procurando-se correlacionar a ocorrência de cavidades com o contexto geológico e geomorfológico em que estas se inserem, assim como análises de locais com maior potencial espeleológico para orientar os trabalhos de campo. Análises sobre as particularidades do relevo e a compartimentação geomorfológica foram possíveis com a geração de modelos tridimensionais da área de estudo.

Com relação aos trabalhos de SR, foram feitas considerações acerca dos produtos dos sensores, das técnicas de processamento utilizadas para a discriminação dos carbonatos e sobre as características espectrais das imagens provenientes dos vários sensores utilizados.



**Figura 1.1: Fluxograma dos principais procedimentos nas atividades de SIG e SR**

## 1.5 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização de SR em atividades de mapeamento geológico é histórica, tendo apresentado resultados positivos em diversas aplicações desde a entrada em operação dos primeiros satélites imageadores, com destaque para a exploração mineral. Uma visão geral sobre esta temática pode ser obtida em Rajesh (2004), Sabins (1999), Sabine (*in* Rencz, 1999) e Bedell (2004), onde são abordados tópicos como características dos sensores ETM+ e ASTER, técnicas de processamento de imagens, assinatura espectral de minerais e rochas, mapeamento litológico, estrutural e de alteração, espectroscopia de imageamento e mesmo a integração dos dados de SR em um ambiente SIG.

Os trabalhos voltados à exploração mineral se beneficiaram imensamente dos dados do sensor ASTER para mapeamento de minerais de alteração (Crósta *et al.* 2003, Rowan 2003b, Souza Filho 2003, Hubbard 2003). Com relação aos trabalhos voltados para a identificação de carbonatos, Ninomiya (2003) propõe a utilização de índices a partir das bandas do termal do ASTER para a detecção de quartzo e carbonatos, enquanto Yamagushi (1999, 2003) utiliza-se também de índices para a alunita, caolinita, calcita e montmorilonita, mas das bandas do SWIR. Rowan (2003) utiliza procedimentos de classificação espectral para segregação de calcários calcíticos e dolomíticos.

Além das já conhecidas aplicações de análise por principais componentes em exploração mineral (Crósta 1989, Loughlin 1990, Crósta *et al.* 2003), é digno de referência o trabalho de Poursaleh (com. pess.), que utilizou este método de transformação para segregar calcários de dolomitos a partir das bandas do SWIR do ASTER. Franca-Rocha (2003) utilizou técnicas de contraste, razões entre bandas, análise por principais componentes e classificações supervisionadas para discriminar unidades geológicas, destacar feições de interesse e expor diferenças sutis na assinatura espectral dos componentes na Bacia do Irecê – BA. Lima (2003), utilizou dados dos sensores Landsat e ASTER e espectroscopia de reflectância para identificar gossans associados a mineralizações de Pb-Zn-Ba na bacia do Irecê, BA.

A caracterização de carbonatos através de espectroscopia de reflectância foi explorada por Gaffey (1986), que identificou pelo menos sete feições de absorção na região entre 1.6 e 2.55  $\mu\text{m}$  para a

calcita, aragonita e dolomita. Ramsey (2002) propôs um método automatizado de identificação de minerais a partir de um algoritmo adaptado para redes neurais, enquanto van der Meer (1996) utilizou espectroscopia de laboratório e dados de campo para gerar a coluna estratigráfica das unidades carbonáticas expostas na área de Moltalbán, centro-norte da Espanha.

Alguns trabalhos enfocam a utilização de SIG e SR voltados à análise do uso e ocupação do solo, fitofisiografias e mapeamento pedológico, inclusive para a área em estudo. Arcoverde (2005) realizou o refinamento do mapeamento pedológico em relevos cársticos na região de Paracatu e Unaí a partir de análises morfométricas. Barbosa (2005) se valeu de SIG e SR para subsidiar a criação e plano de uso de uma unidade de conservação, o Parque Municipal de Sussuapara, TO, tendo analisado o uso e ocupação do solo, as características ambientais da região e impactos antrópicos.

Mais específicos em relação à área em estudo, temos os trabalhos de Köhler (1999) que produziu as primeiras análises de aspectos geológicos, geomorfológicos e de uso e ocupação do solo da região de Januária e Jaíba, MG, utilizando-se de imagens Landsat. Gomes & Maillard (2003) realizaram o mapeamento fitogeográfico das UC's<sup>4</sup> da bacia do rio Peruaçu, utilizando-se de classificações multiespectrais e texturais do sensor ETM+.

---

<sup>4</sup> APA Cavernas do Peruaçu, Parque Estadual Veredas do Peruaçu, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu

## ***CAPÍTULO 2: A ÁREA DE ESTUDO***

---

### **2.1 – INTRODUÇÃO**

#### **2.1.1 – LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO**

A área em estudo localiza-se no norte do Estado de Minas Gerais, distante cerca de 650 km da capital Belo Horizonte, abrangendo áreas dos municípios de Januária, Itacarambi e São João das Missões, entre as coordenadas 14°54' e 15°15' de Latitude Sul e 44°04' e 44°22' de Longitude Oeste (Figura 2.1).

O acesso ao PNCP se faz a partir de Belo Horizonte, através da rodovia BR-040 até o trevo de Curvelo. Daí toma-se a rodovia MG - 135, atravessando a cidade de Montes Claros e Januária. Segue-se no sentido de Itacarambi por cerca de 50 Km, até o distrito de Fabião I, onde se localiza a Sede Administrativa do IBAMA e entrada do PNCP, percorrendo-se um total de 650 Km.

A sede administrativa do PNCP e posto de fiscalização do IBAMA se localizam no município de Januária, distrito de Fabião I. Cerca de 2 km à frente da sede administrativa, em direção N, localiza-se a entrada e limite do PNCP.

O Parque Nacional Cavernas do Peruaçu é uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, criada através do Decreto Federal s/n, datado de 21 de setembro de 1999 e que tem por objetivos [... proteger o patrimônio geológico e arqueológico, amostras representativas de cerrado, floresta estacional e demais formas de vegetação natural existentes, ecótonos e encraves entre estas formações, a fauna, as paisagens, os recursos hídricos, e os demais atributos bióticos e abióticos da região] (IBAMA 2005a).

O PNCP está inserido na bacia hidrográfica do rio Peruaçu, tributário esquerdo do alto-médio curso do rio São Francisco, no norte do Estado de Minas Gerais, abrangendo áreas dos municípios de Januária, Itacarambi e São João das Missões, entre as coordenadas 14°54' e 15°15' de Latitude Sul e 44°04' e 44°22' de Longitude Oeste (Figura 2.1).

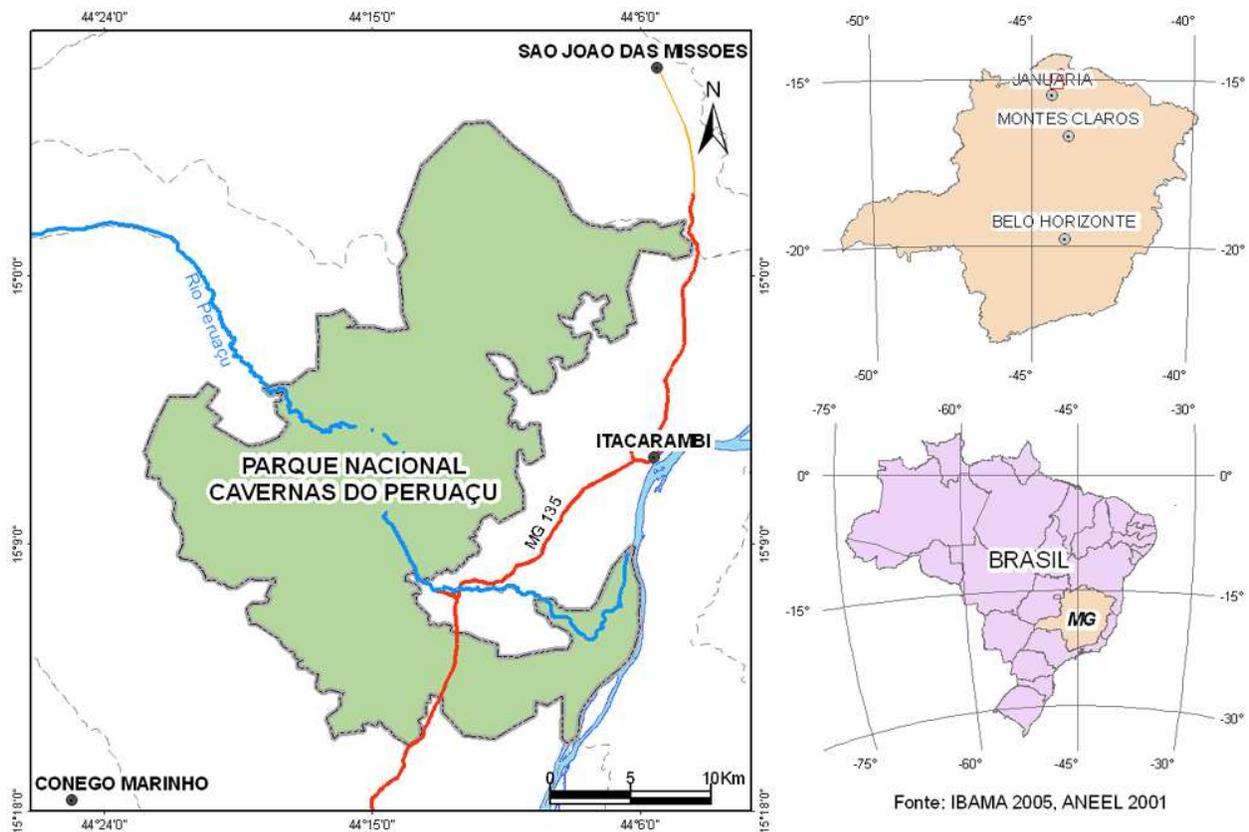


Figura 2.1: Mapa de localização da área de estudo e acesso ao PNCP

## 2.1.2 – LIMITES DA UNIDADE DE CONSERVAÇÃO

O PNCP possui uma área aproximada de 56.500 ha e perímetro de 227 km, confrontando-se ao norte, com a Reserva Indígena Xacriabá, a sudeste com o Rio São Francisco, estando a Leste do Parque Estadual Veredas do Peruaçu. Suas porções NW e SE confrontam com a Área de Preservação Ambiental Cavernas do Peruaçu, criada pelo Decreto 98.182, de 26 de setembro de 1989. Com uma área de 143.866 ha e perímetro de 229 km, esta APA abrange a quase totalidade da Bacia Hidrográfica do Rio Peruaçu.

## 2.2 - ASPECTOS DO MEIO FÍSICO

### 2.2.1 – CLIMA

O clima da região enquadra-se no padrão BSW, isto é, quente, seco e com chuvas de verão. A pluviosidade apresenta ciclo básico bem definido, com um verão chuvoso (de novembro a abril) e inverno

seco (de maio a outubro). As chuvas apresentam uma distribuição irregular, sendo que os valores situados entre 900 e 1.100 mm distribuem-se principalmente nos meses de dezembro e janeiro. A temperatura média é de 24°C, variando de 16° C para as mínimas e 34° C para as máximas. As precipitações médias anuais são da ordem de 850 mm, variando de 450 mm a 1400mm (GBPE 1999).

A circulação atmosférica das massas de ar (Polar atlântica, Tropical atlântica, Equatorial continental e Tropical continental) é a principal responsável pelo clima regional. No entanto, as características climáticas da zona semi-árida nordestina exercem influência direta sobre a porção NE de Minas Gerais também, devido à baixa pluviosidade observada (IBAMA 2005b).

O domínio climático do cerrado é quente e semi-úmido, ao passo que a caatinga apresenta um domínio quente e seco. Acredita-se que a morfologia dos terrenos cársticos, hidrografia e a cobertura vegetal contribuam para as diferenciações nas circulações atmosféricas, gerando microclima no vale do rio Peruaçu (GBPE 1999).

## 2.2.2 – GEOLOGIA

A área em estudo se localiza no Alto-médio curso do rio São Francisco, instalada no cráton homônimo, que se constitui em um núcleo crustal estabilizado no final do ciclo Transamazônico (2100-1800 Ma), margeado por feições que sofreram regeneração durante o ciclo Brasileiro (450 a 680 Ma) (Almeida 1977).

No limiar do Proterozóico Médio para com o Neoproterozóico, eventos tectônicos marcantes tiveram lugar nas bordas da região em que se estabeleceria posteriormente o cráton do São Francisco (COMIG 1994). Neste momento, o Paleocontinente São Francisco se encontrava em altas latitudes, vindo a sofrer deposição de sedimentos glaciogênicos da Formação Jequitaiá. Com o fim da glaciação o nível dos mares subiu significativamente, enquanto o Paleocontinente São Francisco migrou em direção a uma zona intertropical. Sob essas condições se inicia a sedimentação do Grupo Bambuí, numa seqüência deposicional pelito-carbonatada.

São identificadas três grandes unidades litoestratigráficas na região: Coberturas Cenozóicas indiferenciadas, a Formação Urucuaia, de idade Mesozóica e o Grupo Bambuí (Figura 2.2), do Neoproterozóico. Foi registrada também a ocorrência restrita de rochas do embasamento cristalino,

pré-Bambuí, nos arredores do PNCP. O histórico geológico regional se inicia com a deposição de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, sobre o embasamento cristalino, constituído de rochas granodioríticas e grani-to-gnáissicas, ainda mais antigas.

Segundo Martins (1998), foi identificado um conjunto de quinze fácies/associações de fácies no Gr. Bambuí que sugerem uma origem associada a ambientes de deposição predominantemente marinhos. Esta deposição ocorreu em mar raso, com alta salinidade, em uma plataforma estável, sendo que a regressão deste mar é marcada pela deposição de argilitos que recobrem a seqüência carbonática (Schobbenhaus *et al* 1984).

Sobre as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, um hiato erosivo apagou as seqüências e eventos de idade Paleozóica, tendo as rochas siliciclásticas da Formação Urucua, do Mesozóico Superior, se depositado diretamente sobre este Grupo (IBAMA 2005b).

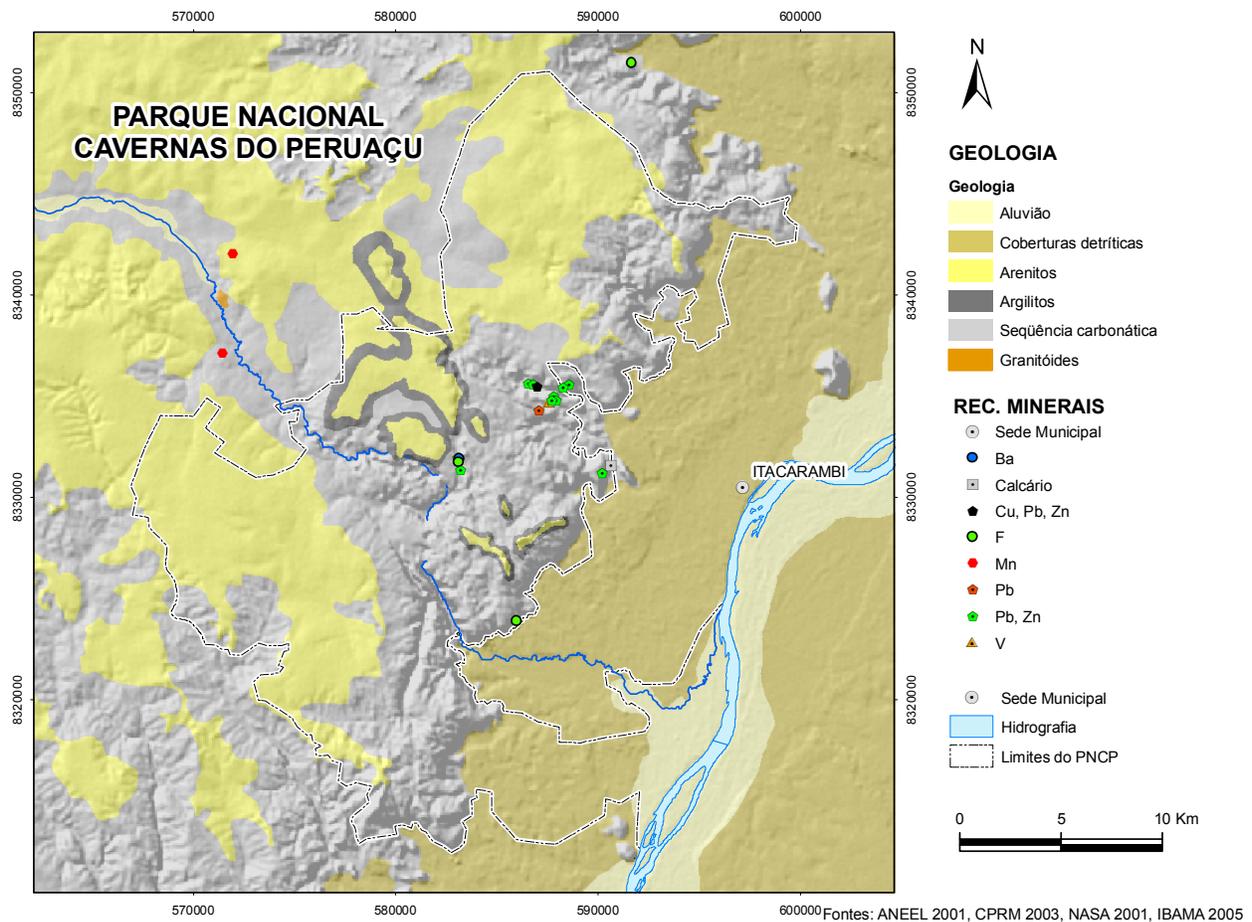


Figura 2.2 - Mapa geológico e de recursos minerais da região do PNCP sobre modelo SRTM

A deposição da Formação Urucuia se inicia no Cretáceo Médio a Superior, com a sedimentação de siltitos avermelhados e arenitos, processo que termina ainda no final do Cretáceo. Acima dos siltitos e arenitos encontram-se depósitos detrítico-lateríticos, formados em época posterior à deposição e diagênese dos arenitos, devido à remobilização de óxidos de Fe e Mn.

Esses processos ocorreram, possivelmente, em condições tropicais úmidas em alternância com períodos mais secos, no contexto do desenvolvimento da Superfície de Aplainamento Sul-Americana, na transição entre o Cretáceo e o Terciário (RADAMBRASIL 1982).

No período final da deposição da Formação Urucuia, do final do Cretáceo para o início do Cenozóico, ocorrem fenômenos tectônicos que culminam com a instalação do *rift* do rio São Francisco. Segundo King (1956), este *rift* se formou a partir de um soerguimento crustal durante o Oligoceno, momento em que se estabelece um novo nível de base, culminando com a formação das coberturas recentes.

Durante o Terciário há o início do desenvolvimento de uma rede de condutos nas rochas carbonáticas, resultado dos processos de circulação da água subterrânea no nível freático. Estes processos, concomitantes ao soerguimento ocorrido no Oligoceno, culminaram com a abertura do vale cárstico do rio Peruaçu, resultado do colapso de trechos do teto de cavernas (Piló 1989; Moura 1997).

A Formação Urucuia é uma unidade composta por rochas do Cretáceo Superior, caracterizada, principalmente, por fácies arenosas com matriz argilosa de composição montmorilonítica e por níveis conglomeráticos esporádicos (Kattah 1991). Na área em estudo, esses arenitos expressam-se geomorfologicamente por “tabuleiros” e chapadas isoladas nos altos interflúvios dos rios Urucuia e São Francisco, estendendo-se até o estado do Maranhão (Braun 1970 *apud* Kattah 1991). Na região em estudo, a Formação Urucuia possui espessuras de 5 a 10m, podendo atingir 90 m (Lopes 1981), sendo constituída por um pacote de arenitos bem selecionados, com espessuras variáveis, com conglomerados na base e arenitos argilosos (COMIG 1994).

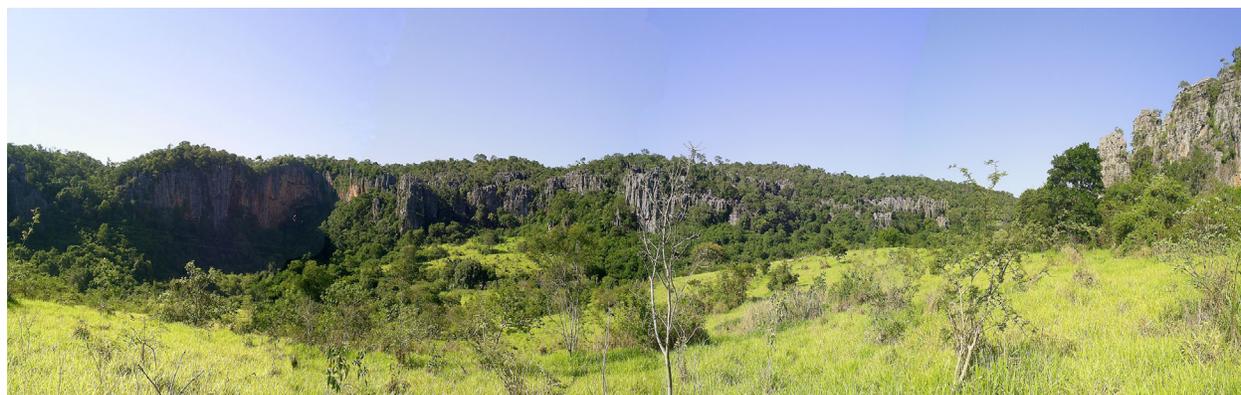
O Grupo Bambuí se subdivide em Subgrupo Paraopeba (unidade basal), que engloba, da base para

o topo, as Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade. No topo do Grupo Bambuí encontra-se a Formação Três Marias.

Formação Sete Lagoas - Composta por uma seqüência carbonática e, secundariamente, pelítica, em que a litologia carbonática é constituída de lentes de várias dimensões, compostas por dolomitos e calcários variados, muitos destes com estromatólitos colunares e oólitos. Um ambiente de águas calmas e quentes, marinho sublitorâneo, é proposto para a deposição destes sedimentos. Na região de Januária/Itacarambi os calcários formam um espesso pacote horizontalizado e recebem a denominação de Formação Januária (Dardenne 1978) (Figura 2.3). Neste horizonte encontram-se as cavernas da



**Figura 2.3: Vista dos calcários do Grupo Bambuí na serra do Cardoso das Minas**



**Figura 2.4: Vista do *poljê* da Terra Brava, com o acesso à entrada da Gruta Janelão à esquerda**

região e também de outras áreas cársticas do estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás. Sua espessura é estimada em 420 metros (Chiavegatto *et al* 1997) (Figuras 2.3 e 2.4).

Formação Serra de Santa Helena – Unidade predominantemente pelítica, é composta por siltitos, folhelhos e quartzitos finos. Possuem lentes de margas e calcários escuros oolíticos e psolíticos com calcita recristalizada. Sua deposição se deu em ambiente marinho sublitorâneo, agitado por ondas e correntes de maré. Sua espessura é estimada em 150 metros no vale do São Francisco (Chiavegatto *et al* 1997).

Formação Lagoa do Jacaré – Esta formação é compreendida pela alternância de calcilutitos/calcarenitos oolíticos e pisolíticos cinza escuros, fêtidos, cristalinos intercalados subordinadamente com siltitos e/ou margas. Segundo Chiavegatto *et al* (1997), esta unidade apresenta espessura de 100 metros e sua passagem para a Formação Serra da Saudade, sobrejacente, é transicional.

Formação Serra da Saudade – É representada por folhelhos e argilitos verdes que gradam para siltitos feldspáticos ou arcossianos no topo da unidade.

Formação Três Marias - Constituída por siltitos e arcóseos cinza-esverdeados empilhados em um sistema deposicional de plataforma, constituído essencialmente por sequências tempestíticas cíclicas (Chiavegatto 1992) que se alternam, representando as fases de transgressão - regressão do “Mar Bambuí”. Seu contato com os sedimentos pelíticos da Formação Serra da Saudade é concordante e transicional. Sua espessura é muito variável, passando de 250 metros perto da barragem de Três Marias (Dardenne 1978).

Segundo Piló (1997), as seqüências carbonáticas e terrígenas da região foram levemente afetadas por esforços tectônicos do Ciclo Brasileiro, resultando em padrões estruturais identificados como fraturas e falhas de direções NNE/SSW e NW/SE, o qual parecem controlar o sistema de drenagem da região. Ocorrem dobras muito suaves nos calcários, de natureza simétrica, ou ainda pequenas falhas de baixo ângulo de mergulho. O acamamento sedimentar da seqüência carbonática encontra-se bem preservado, posicionando-se sub-horizontalmente ou com leve caimento para sudeste. O metamorfismo parece ser

ausente ou talvez incipiente, podendo-se considerar o conjunto rochoso tipicamente sedimentar.

Não há registros de grandes falhamentos, mas somente um conjunto de falhas normais que condicionam o curso do Rio São Francisco, denominada Falha de Januária. Este sistema de falhas de direção NE-SW coloca as unidades Sete Lagoas e Serra da Saudade em cotas semelhantes.

### 2.2.3 – RECURSOS MINERAIS

Os principais recursos minerais da área estão relacionados aos distritos de flúor-chumbo-zincífero de Januária-Itacarambi-Montalvânia e ao distrito manganésífero do Peruaçu (Pinto *et al* 2001) (Figura 2.2).

No primeiro distrito, as mineralizações são de sulfetos de chumbo (galena) e zinco (esfalerita), freqüentemente envolvidos por óxidos desses elementos (cerussita, anglesita e smithsonita). Willemita, óxidos de vanádio, calcopirita, calcocita e malaquita podem se associar ao minério principal. Quartzo e calcedônia constituem a ganga principal, secundados por calcita, dolomita, barita, fluorita, óxido de ferro e pirita.

O distrito flúor-chumbo-zincífero é caracterizado por mineralizações hospedadas em dolomitos rosados, em contatos entre dolomitos rosados e dolomitos bege, em níveis algálicos e em descontinuidades estratigráficas e estruturais.

O distrito manganésífero do Peruaçu é caracterizado pela presença do minério de manganês relacionado a veios de silixito manganésífero, com espessuras médias entre 10 e 20 m e eventualmente superiores a 50 m. Os veios cortam o granodiorito porfirítico do embasamento e os calcários escuros do grupo Bambuí.

O minério acumula-se na superfície, no solo e colúvio, em massas de tamanhos irregulares desde matacões a pequenos blocos, resultado da aglutinação de massas menores por cimento manganésífero. Destacam-se as minas do Chicão e a da fazenda Vargem Grande/Sumaré, de propriedade da Mineração Peruaçu Ltda. Os teores de manganês variam de 33% até 48,2% (Pinto *et al* 2001).

## 2.2.4 – GEOMORFOLOGIA E HIDROLOGIA

Com base na litologia e na topografia, foram definidas quatro unidades fisiográficas para a bacia do rio Peruaçu: Compartimento do Planalto dos Gerais - CPG, Compartimento da Zona de Transição - CZT, Compartimento Carstificado - CC e Compartimento da Depressão do São Francisco – CDSF (IBAMA 2005b) (Figura 2.5).

O Compartimento do Planalto dos Gerais coincide com os arenitos da Formação Urucuaia, do Cretáceo Superior, em cotas superiores a 760m. O relevo é aplainado, com ondulações suaves, e uma chapada a partir dos 800m, com topo plano e baixa densidade de drenagens. Um conjunto de lagoas parece estar associado a dolinas (de colapso ou subsidência) na seqüência carbonática subjacente.

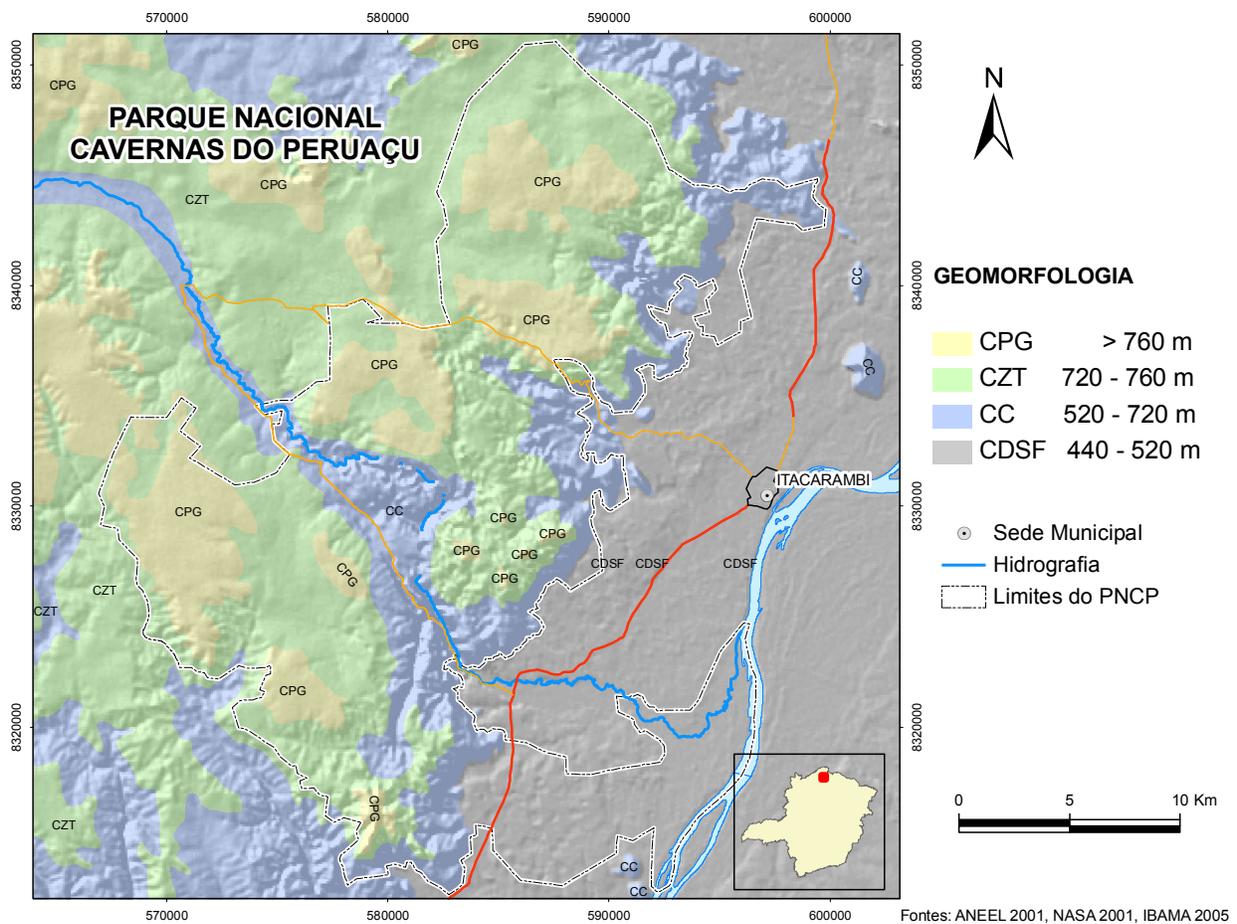


Figura 2.5 - Mapa da compartimentação geomorfológica sobre modelo SRTM

O Compartimento da Zona de Transição, unidade situada entre as cotas 720 a 760 m, possui caráter residual, representado pelas feições de morros residuais tabulares e testemunhos, além de dolinas de subsidência. Neste compartimento observa-se a transição entre o relevo de baixos gradientes do Planalto dos Gerais e o relevo acidentado do Compartimento Cárstico. Uma de suas características é o surgimento de feições cársticas por entre a cobertura arenosa, que se originou à partir do intemperismo da Formação Urucuia. Ocorrem ravinas relacionadas às zonas de ocorrência dos argilitos, que coincidem com o topo da seqüência do Grupo Bambuí na área.

O Compartimento Carstificado situa-se entre as cotas 500 a 720 m, desenvolvendo-se sobre calcários e dolomitos do Grupo Bambuí. Destacam-se o relevo acidentado e a ausência de rede de drenagem contínua, avançados processos de dissolução, processos de incisão e transporte de sedimentos, estando localmente exumado (Figura 2.4). Piló (1997) dividiu o Compartimento Cárstico em quatro sub-compartimentos: Topo, Fluvio-carste, Depressões Cársticas Fechadas e Escarpamento Escalonado (IBAMA, 2005b). Neste relevo acidentado e ruiforme, várias formas de feições cársticas podem ser observadas, como cavernas, dolinamentos, maciços fissurados, torres, vales, sumidouros, ressurgências e paredões escarpados com intenso lapiezamento (IBAMA 2005c).

O Compartimento da Depressão do São Francisco, situado entre as cotas 440 e 500 m, possui topografia plana e suavemente ondulada, [... instalada sobre um substrato de materiais inconsolidados de idade quaternária, formado por coberturas detríticas (areias finas e argilas sílticas) e Latossolos Vermelho-Escuros, desenvolvidos a partir de material residual intemperizado do Grupo Bambuí] (IBAMA 2005b). Vários morros testemunhos em rocha carbonática elevam-se em meio à planície, em cotas de até 600 m. Conduitos em carbonatos subjacentes à cobertura capturam sedimentos, originando dolinas de subsidência lenta.

Três aquíferos ocorrem na área de estudo. Nas veredas localizadas no planalto, um aquífero granular de alto potencial hidrológico se desenvolveu sobre arenitos da Formação Urucuia. Um aquífero cárstico fissurado ocorre no planalto, caracterizado por alta porosidade secundária devido aos conduitos e fraturas dos pelitos e carbonatos do Grupo Bambuí. Estendendo-se pela Depressão Sanfranciscana, observa-se o aquífero aluvial, além do aquífero relativo às coberturas do Terciário e Quaternário, que possuem espessuras variáveis e recobrem as porções de

carbonatos carstificados, apresentando características mistas (IBAMA 2005b).

Os fatores estruturais condicionaram as drenagens a um padrão dendrítico, seguindo as direções principais de fraturamento da plataforma brasileira (NE/SW e NW/SE) (GBPE 1999). Existem poucos cursos superficiais, os quais apresentam um entalhamento vertical acentuado, considerando-se sua largura. Desses poucos cursos, destaca-se o rio Peruaçu, único curso hídrico perene dentro dos limites do PNCP. Esta drenagem corre inicialmente sobre os pacotes sedimentares da Formação Urucuia, passando sobre carbonatos e pelitos em seu médio curso e sobre sedimentos inconsolidados no baixo curso (IBAMA 2005b).

A região apresenta feições típicas de um fluvio-carste extremamente expressivo no cenário natural do Brasil, destacando-se tanto a morfologia subterrânea, como a superficial (Piló 1997a). Um cânion de abatimento de 9 Km de comprimento por cerca de 150 m de profundidade e 50 m de largura é a principal feição deste fluvio-carste, apresentando sumidouros e ressurgências, segmentos de curso subterrâneo e vales secundários perpendiculares. Ao longo deste cânion principal e dos vários cânions cegos encontram-se escarpas com altitudes variando entre 150 e 200 metros.

O endocarste está diretamente relacionado ao sistema fluvio-carstístico do Rio Peruaçu. As cavernas hidrologicamente ativas distribuem-se ao longo da calha principal do rio, ao passo que as cavernas secas encontram-se junto aos vales secundários perpendiculares ao vale do rio. Um terceiro grupo se localiza no topo do planalto cárstico, não estando associado ao sistema do rio Peruaçu (Piló 1997a).

Paredões, escarpas, maciços individualizados e morros testemunhos, geralmente com morfologia ruiforme, além de depressões fechadas e cavernas, são as feições geomorfológicas mais significativas da região, resultado da interação do caudal hídrico com as estruturas geológicas e a litologia carbonática.

#### 2.2.5 – ESPELEOLOGIA

As primeiras referências bibliográficas às cavernas do vale do rio Peruaçu remontam a 1939, ano da publicação do livro “As Cavernas em Minas Gerais”, uma coletânea de informações reunidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Desde então, geólogos, espeleólogos e arqueólogos vêm realizando pesquisas num dos mais expressivos e importantes sítios espeleológicos e geomorfológicos do Brasil (Piló *et al* 2003).

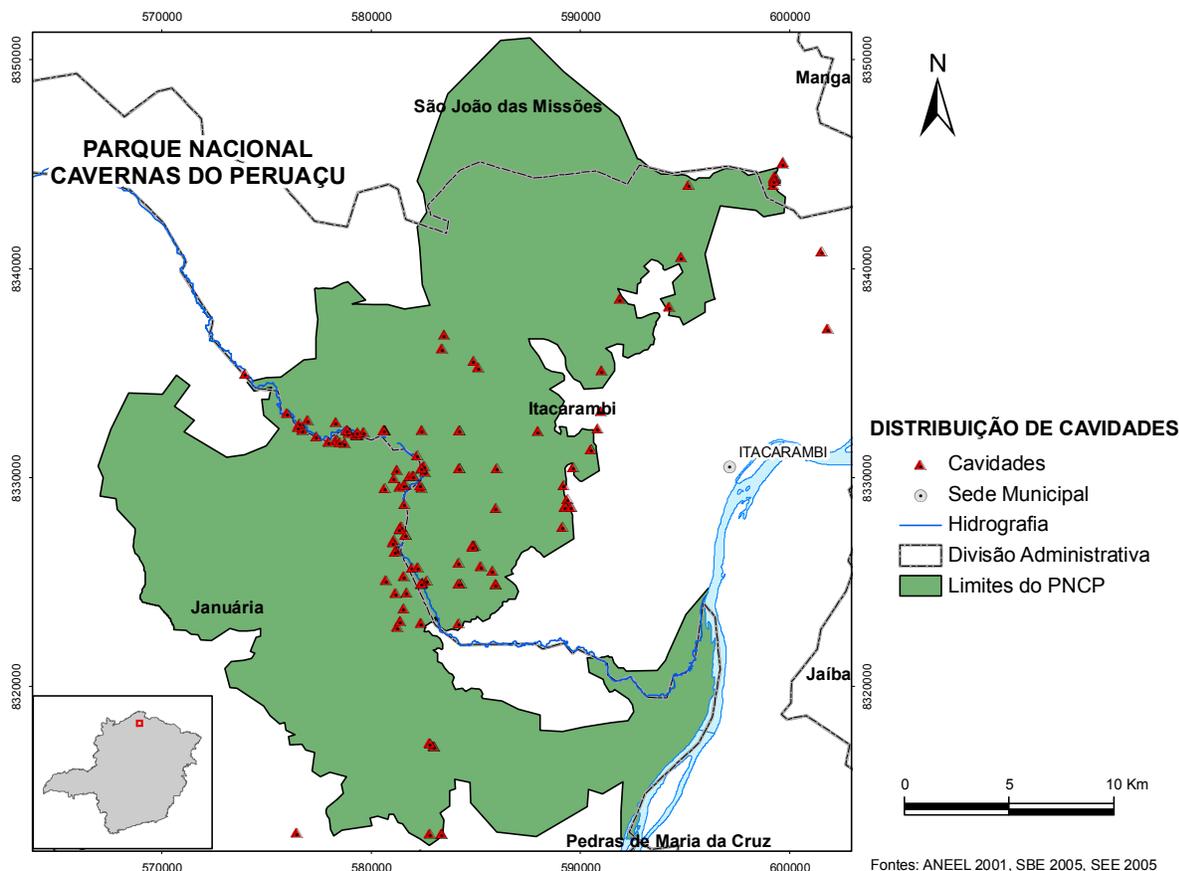


Figura 2.6 - Mapa de distribuição da cavernas e sítios arqueológicos na região do PNCP

A expressividade do patrimônio espeleológico do PNCP pode ser verificada a partir do seu conjunto paisagístico, da monumentalidade e concentração de cavernas, diversidade das formas de relevo, potencial científico e turístico.

Há registros de 14 cavernas em São João das Missões, uma em Cônego Marinho, 66 em Itacarambi e 95 em Januária, distribuídas em duas concentrações principais, uma primeira no vale cárstico, em direção NW/SE, e uma segunda na base da escarpa de erosão remontante, de direção NE/SW. No entanto, estas cavernas registradas representam uma parcela pequena do potencial espeleológico da região, que tiveram levantamentos espeleológicos, em geral concentrados na área do cânion principal (Figura 2.6).

As cavernas do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu se desenvolvem em calcários e dolomitos do Grupo Bambuí, Formação Januária/Itacarambi, que podem ser divididos em duas litofácies principais, informalmente denominadas de Inferior e Superior. A litofácies superior consiste de calcários laminados,

com até 98% de calcita, de textura fina, pretos, com níveis de brechas intraformacionais e laminações algálicas, com ocorrência de margas no topo. A litofácies inferior se apresenta como um calcário laminado com níveis pelíticos milimétricos e lentes decimétricas de sílex negro. Compõe-se de 90% de calcita, 7% de dolomita e 2% de quartzo (GBPE 1999).

A feição geomorfológica mais significativa é o vale do rio Peruaçu, que se desenvolve sobre carbonatos à partir da drenagem de águas allogênicas, podendo ser considerado um típico fluviocarste, na classificação de White (1988).

Este cânion se inicia a 1 Km a montante do primeiro sumidouro, na Gruta Brejal, desenvolvendo-se até 2 Km antes do Distrito de Fabião. Deste percurso, próximo de 13 Km de extensão, cerca de 4.800 m de condutos testemunham [...etapas de transformação do sistema subterrâneo em um sistema de drenagem superficial, com a formação do cânion] (IBAMA 2005c).

O alargamento continuado de antigos condutos freáticos através do entalhamento vadoso favoreceu a ocorrência de intensos processos de incasão que colapsaram o teto, gerando a segmentação parcial do curso do rio numa série de sumidouros e ressurgências. Esta segmentação se inicia na Gruta Brejal, passando pelo Arco da Conexão, Túnel do Vento, Arco do André, Grutas Troncos e Cascudos e Gruta



**Figura 2.7: Vista da entrada e primeira clarabóia da Gruta Janelão**



**Figura 2.8: Vista da Dolina dos Macacos do interior da Gruta Janelão**



**Figura 2.9: Vista da entrada da Gruta Bonita**

Janelão. A gênese dessas cavernas está ligada à evolução do sistema de condutos freáticos para um sistema de condutos vadosos.

A morfologia das principais cavernas da região segue o controle estrutural dos planos de acamamento da rocha hospedeira e pelo par de fraturas cisalhantes conjugados (Silva *et al* 2004), assumindo um padrão de desenvolvimento linear ou meandrante, com perfil horizontal e seções transversais retangulares ou elípticas. Em geral, há o predomínio de amplos condutos, sinuosos, com poucas ramificações, que seguem as direções principais das fraturas, de orientações preferenciais N240 e N330, além de N270, N130 e N220 (IBAMA 2005c).

Piló (2003) dividiu as cavidades em relação ao nível de base do rio, em dois grupos: as cavernas ativas, drenadas pelo rio Peruaçu e as cavernas secas, desconectadas do aquífero cárstico. As cavernas ativas são aquelas cujas galerias são percorridas pelo rio Peruaçu em seu estágio atual (Figuras 2.7 e 2.8). As cavernas secas são aquelas posicionadas em níveis superiores ao da calha atual do rio. Esses posicionamentos fazem-se dentro cânion principal do rio, em paredões recuados em relação a este



**Figura 2.10: Vista do rio Peruaçu no interior da Gruta Janelão, da borda da Dolina dos Macacos**

(Figura 2.9), ou ainda em vales secos secundários (Piló 1989).

Os depósitos químicos nessas cavernas são abundantes e variados, conferindo grande beleza cênica à entrada e ao interior das cavidades, podendo vir a obstruir completamente condutos ou galerias. Entre os espeleotemas, destacam-se as pérolas, os “escudos”, as estalactites da Gruta Janelão, os cristais “dente-de-cão” e “canudos de frescos” da Gruta Bonita e da Gruta da Hora, as represas de travertino da Lapa do Rezar e as estalagmites arborescentes da Gruta do Carlúcio.

Os depósitos clásticos, bastante comuns nas grutas drenadas pelo rio, se apresentam na forma de terraços fluviais de extensão, granulometria e camadas variáveis. Sua composição inclui fragmentos de calcário, espeleotemas, laterita e sílex, em geral suportados por matriz argilosa a arenosa. Dentre os depósitos clásticos destacam-se os blocos abatidos, de dimensões milimétricas a métricas, resultado de processos generalizados de incisão, responsáveis pela abertura de grandes clarabóias no teto de algumas das cavernas (Figura 2.10).

O patrimônio espeleológico do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu se estende muito além da concentração de cavidades da calha principal do rio. Há diversas cavernas localizadas em outras áreas do compartimento carstificado que possuem padrões morfológicos, dimensões e ornamentação distintos, resultado de processos espeleogenéticos diferenciados.

Em seu conjunto, as cavidades do PNCP possuem atributos e elementos que devidamente estudados, poderão gerar informações acerca da gênese e evolução do relevo cárstico, alterações climáticas verificadas na região, as formas de utilização do ambiente e a evolução das tecnologias utilizadas pelas populações pré-históricas.

## **2.3 – ASPECTOS DO MEIO BIÓTICO**

### **2.3.1 – COBERTURA VEGETAL**

O PNCP situa-se em uma região limítrofe entre os domínios da Caatinga e do Cerrado. Esta região é ocupada por formações de Floresta Estacional Decidual Montana, Floresta Estacional Semidecidual, Savana Arborizada e área de tensão ecológica entre Savana Estépica

e Floresta Estacional, conforme apresentado no mapa de vegetação do Brasil (IBGE 1992).

A vegetação na região, é constituída por uma fração de Caatinga Arbórea, relacionada ao compartimento de cimeira, podendo ser arbórea aberta (estrato arbóreo e outro herbáceo, entrecortados de solos expostos) ou arbórea densa (árvores de troncos finos, de 6 a 12 m e espaçados irregularmente, estrato arbustivo com cipós, cactáceas, bromeliáceas e gramíneas).

Uma segunda fração é representada pela Floresta Caducifólia, ou mata seca, geralmente associada ao compartimento cárstico que apresenta espécies arbóreo-arbustivas decíduas.

A Floresta Perenifólia / Subperenifólia, também denominada de mata ciliar, é encontrada principalmente no compartimento cárstico, além de solos aluviais eutróficos de textura argilosa.

A Floresta Subcaducifólia, ou mata semidecídua, é também encontrada no compartimento cárstico, sobre partes mais altas das vertentes dos cursos fluviais. Em geral está associada a Cambissolos Eutróficos, Latossolos e Solos Aluviais, com estratos arbóreos, arbustos, ervas e lianas.

A Caatinga Arbustiva Arbórea é encontrada em compartimentos de cimeira, se desenvolvendo sobre terrenos arenosos, Latossolos Vermelhos-Amarelos. Destacam-se as árvores espinhosas, com poucas lianas, poucas cactáceas e estrato arbóreo raro e esparso. É uma formação densa, com 2 a 5 m de altura, formada por arbustos e árvores entrelaçados.

A Caatinga Hiperxerófila é representada por uma caatinga baixa com cactáceas, associada às áreas cársticas, em encostas abruptas e terraços, em pequenas áreas sobre calcário ou ardósias. É constituída basicamente de cactáceas, estendendo-se por toda a Serra do Cardoso de Minas.

O Cerrado é encontrado no compartimento de cimeira, associado às superfícies de aplainamento, sobre arenitos e siltitos. Seu estrato varia de 7 a 8 m de altura, pouco denso.

Considera-se que [...não existe uma divisão exata entre estas formações florestais, mas um gradiente no incremento da biomassa, iniciando com a presença exclusiva de gramíneas (campo graminoso) aumentando aos poucos a densidade e o porte de indivíduos lenhosos (arbustos, arvoretas e árvores) até atingir uma estrutura florestal, quando se caracteriza o cerradão] (IBAMA 2005b).

Existe uma relação muito estreita entre o substrato geológico e a vegetação na região do vale do rio Peruaçu. Considera-se que este é o fator determinante para a sua distribuição, sendo que a disponibilidade hídrica do meio é secundária, relacionando-se mais com o porte das formações vegetais (IBAMA 2005c).

### 2.3.2 – PALEONTOLOGIA

Os estudos paleontológicos na área do PNCP são recentes e ainda incipientes, com poucas ocorrências de fósseis em cavernas da região. Essas lacunas na informação não permitem que se estabeleçam relações entre a paleofauna regional ou aos paleobiomas a que estava associada. Isso se deve muito mais à falta de levantamentos sistemáticos e especializados do que a um baixo potencial da área.

Em trabalhos paleontológicos na região, foram evidenciadas várias espécies, destacando-se moluscos (*Bivalvia* e *Gastropoda*), répteis (*Tupinambis* sp.), aves e mamíferos das Ordens: *Chiroptera*, *Edentata* (*Cabassous unicinctus*, *Dasyus* sp.), *Rodentia* (*Agouti paca*), *Carnivora* (*Eira barbara*), *Proboscidea* (†*Haplomasthodon waringi*), *Perisodactyla* (*Tapirus terrestris*), *Artiodactyla* (*Tayassu tajacu*, *Mazama* sp.) (IBAMA 2005b). São dignas de nota as ocorrências de fósseis de megamamíferos pleistocênicos encontrados na Gruta Olhos do Brioco e Gruta da Preguiça.

## 2.4 – ASPECTOS DO MEIO ANTRÓPICO

### 2.4.1 – A OCUPAÇÃO PRÉ-HISTÓRICA

O patrimônio arqueológico do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu constitui-se num dos mais expressivos e representativos registros da ocupação humana em território nacional, referência para a cronologia do povoamento do Brasil.

As pesquisas arqueológicas realizadas pelo Setor de Arqueologia da UFMG permitiram formular um quadro geral de ocupações, desde os primeiros caçadores-coletores que se instalaram no vale, passando



**Figura 2.11: Vista da entrada e escavação da Lapa do Boquete**



**Figura 2.12: Vista em detalhe da escavação da Lapa do Boquete**

Os vestígios mais comuns são os materiais líticos, pinturas rupestres, estruturas de combustão, restos alimentares animais e vegetais, além de sepultamentos, fibras vegetais, adornos. Diferentes vestígios de plantas cultivadas encontradas nesses sítios dão informações acerca do início da agricultura no Brasil, enquanto os registros gráficos verificados na região permitem [... abordagens metodológicas novas e estabelecimento de uma cronológica (*sic*) relativa, local, segura, cujos elementos já foram encontrados em outras partes do Brasil central e nordestino] (IBAMA 2005a).

As ocupações pré-históricas no vale se estendem à passagem do Pleistoceno ao Holoceno, com pelo menos 12.000 anos B.P., conforme os vestígios encontrados na Lapa do Boquete (Figuras 2.11 e 2.12). As primeiras populações de caçadores-coletores que se instalaram nesta região privilegiaram a ocupação de abrigos a menos de 1 Km de distância de cursos d'água. Estes sítios estão localizados nos afloramentos que beiram a calha principal do rio Peruaçu, preferencialmente em cotas mais elevadas que o fundo do vale (IBAMA 2005b).

A ocupação inicial, entre 12.000 e 9.000 anos B.P., é representada por uma alta densidade de material lítico encontrada junto aos abrigos-sob-rocha. Os restos alimentares dão alguma idéia da dieta dessas populações de caçadores coletores. Incluem bivalves de água doce e coquinhos, pequenos roedores, aves, batráquios, tatus e porco do mato. Uma mudança significativa na indústria lítica é verificada entre 9.500 e 8.500 anos B.P.. Torna-se notável a predominância do sílex marrom, criptocristalino, de onde são retiradas lascas de pequeno tamanho.

Até o momento não foram revelados sepultamentos antigos, nem a associação de vestígios humanos e da mega-fauna pleistocênica na região. No entanto, foram escavados vários sepultamentos datados entre 7000 e 4500 anos B.P., de indivíduos de uma população com feições modernas, bem diferentes da “Raça de Lagoa Santa” e muito parecidos com os indígenas atuais.

No Holoceno Médio, entre 7.000 e 2.000 anos B.P., a indústria lítica mantém-se rara nos abrigos, mas com algumas concentrações que demonstram a eventualidade dos trabalhos de lascamento nos abrigos. Em termos de restos alimentares, destacam-se as concentrações de ossos de grandes roedores como o mocó (*Kerodon rupestris*). Representações de tubérculos, que se acredita terem



**Figura 2.13: Detalhe de painel de pinturas rupestres em sítio arqueológico próximo à entrada da Gruta Janelão**



**Figura 2.14: Detalhe das pinturas rupestres da Gruta do Caboclo**

cerca de 3.000 anos, podem estar associadas ao momento de domesticação de plantas, ainda que as provas não sejam conclusivas. Sepultamentos isolados foram encontrados na Lapa do Boquete e na Lapa do Malhador, contendo pouco material associado, em geral grande quantidade de pigmentos e cordões vegetais (*Idem*).

O período ceramista não se inicia antes de 2.000 anos B.P. na região, a julgar pelos dados arqueológicos disponíveis. Mesmo que não se possa fazer uma associação direta entre o início da horticultura e o surgimento da cerâmica, sabe-se que ambas as técnicas surgiram simultaneamente no alto médio São Francisco.

As pinturas e gravuras rupestres registradas na região compõem um acervo excepcional, seja pela quantidade de ocorrências, seja pela seqüência estilística observada que, em seu conjunto, permite estabelecer diferenciações étnicas e cronológicas relativas. Essas pinturas foram feitas a partir de pigmentos naturais, como óxidos e hidróxidos de ferro, sendo extraídas as cores vermelha e amarela, dióxido de manganês ou carvão, que originava a cor preta e materiais ricos em carbonatos, para a cor branca (Figuras 2.13 e 2.14).

Estes registros gráficos estão distribuídos em grandes grupos que são segregados de acordo com a temática ou técnica empregadas. Destacam-se a Tradição São Francisco, considerada a manifestação mais antiga, que pode remontar a 7.000 anos B.P., a Unidade Estilística Piolho de Urubu, a Unidade Estilística Desenhos, a Tradição Nordeste, além de grafismos de estilos indeterminados e *grafitti* modernos.

O potencial arqueológico do vale do rio Peruaçu está longe de ser esgotado. A continuidade dos trabalhos arqueológicos poderá vir a agregar informações acerca da cronologia das ocupações, das transformações tecnológicas e sua possível relação com as alterações climáticas, a dinâmica de ocupação do território e as práticas rituais. Em suma, o *modus vivendi* e o *modus operandi* das populações pré-históricas que se estabeleceram no vale do rio Peruaçu.

## ***CAPÍTULO 3: SENSORIAMENTO REMOTO***

---

### **3.1 – INTRODUÇÃO**

Este capítulo tem o propósito de apresentar os principais procedimentos do processamento digital de imagens aplicados às imagens multiespectrais ETM+ e ASTER, ortofotocartas e dados SRTM empregados na pesquisa, assim como a caracterização espectro-mineralógica de amostras de diferentes litofácies carbonáticas da área de estudo, obtida por meio da técnica de espectroscopia de reflectância.

Ao final do capítulo, são apresentados os resultados e as limitações encontradas, destacando-se os procedimentos que melhor contribuíram para o objetivo proposto.

### **3.2 – O PROGRAMA LANDSAT**

Iniciado no final da década de 60 com o nome de *Earth Resource Technology Satellite* (ERTS), o programa Landsat foi o resultado de uma iniciativa conjunta da NASA e agências federais dos EUA, tendo por objetivo a aquisição de dados para monitoramento e estudos dos recursos terrestres.

Os primeiros desta série (Landsat 1, 2 e 3), já desativados, operavam com sensores de varredura *MultiSpectral Scanner* (MSS) e câmera *Return Beam Vidicon* (RBV). Na segunda geração (Landsat 4 e 5), a câmera *RBV* foi substituída pelo *Thematic Mapper*, um sensor de varredura com maior resolução espacial e espectral (Sabins 1997). Lançado em 1993, o Landsat 6 (com o sensor *Enhanced Thematic Mapper*) nem chegou a operar devido a falhas operacionais.

A terceira geração deste programa é marcada pelo lançamento, em abril de 1999, do Landsat 7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Avanços técnicos foram incorporados, destacando-se a substituição do sensor TM pelo sensor ETM+, adição da banda pancromática (banda 8) com resolução de 15 m, aumento da resolução espacial da banda termal para 60 m que, em seu conjunto, permitiu melhorias nas características geométricas e radiométricas do imageamento (Sabins 1999). Esse sensor apresentou problemas técnicos em meados de 2003 e, desde então, encontra-se operando com limitações.

Com órbitas sol-síncronas, quase polares, em altitude de 705 km e inclinação de 98.2°, o sensor ETM+ tem uma resolução temporal de 16 dias, com cada cena cobrindo uma área de 180 km x 180 km (Lillesand 1994).

A longa duração do programa Landsat permitiu o imageamento contínuo da superfície terrestre, possibilitando uma cobertura livre de nuvens para a quase totalidade do globo. Suas aplicações, hoje consagradas, permitiram avanço significativo no âmbito das geociências.

Neste trabalho foi utilizada uma cena Landsat7 ETM+, órbita 219, ponto 70, adquirida em 21 de setembro de 2000, ortorretificada, com projeção Universal Transversa de Mercator, fuso 23S, *datum* e elipsóide WGS84.

### **3.3 – O SENSOR ASTER – *ADVANCED THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER***

Lançado em dezembro de 1999 a bordo da plataforma Terra como parte do programa *Earth Observing System (EOS)*, o sensor ASTER resulta de esforços da agência espacial americana e do *Ministry of Economy and Industry (METI)* do Japão (Abrams 2003). Este sensor experimental tem como objetivos científicos a melhoria do conhecimento dos processos que ocorrem na superfície terrestre ou na baixa atmosfera, incluindo as interações da superfície e atmosfera, em escalas locais e regionais (Yamagushi 1998).

O ASTER está a bordo da plataforma Terra numa altitude de 705 Km, em órbita sol-síncrona, quase polar e com resolução temporal de 16 dias. Este sensor é capaz de fornecer dados sobre reflectância, emissividade, temperatura e elevação da superfície, que podem ser convertidos em informações na forma de mapas com múltiplas aplicações em mapeamento geológico e exploração mineral, Cartografia, recursos florestais, meio-ambiente, meio-urbano, entre outros (Souza Filho 2003).

O sensor ASTER possui três sub-sistemas de imageamento independentes que coletam dados no Visível (VIS) e Infravermelho Próximo (NIR), com três bandas espectrais (15 m), Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR), com seis bandas (30 m) e o Infravermelho Termal (TIR), com cinco bandas, na

resolução de 90 m. Adicionalmente, o sistema VIS-NIR conta com um telescópio que opera em retro-visada e que permite a geração de pares estereocópicos, em comprimentos de onda do NIR. Cada cena ASTER recobre uma área de 60 Km x 60 Km.

As vantagens deste sensor são várias, em destaque para a maior resolução espacial, radiométrica e capacidade de estereoscopia a um baixo custo. Já as limitações dizem respeito ao compartilhamento do tempo de imageamento com os outros sensores da plataforma Terra, o que reduz a disponibilidade de cobertura do ASTER.

Neste trabalho foi utilizada uma cena do sensor ASTER (AST\_L1B\_003\_04172001132948\_01302004115038), adquirida em 17 de abril de 2001 às 13:29:48h, em órbita descendente, com ângulo de elevação solar de 56.6393° e azimute de 41.3054°.

### **3.4 – OS DADOS SRTM**

O *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) é um projeto conjunto da *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), *Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt* (DLR) e *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI), com o gerenciamento do projeto e processamento dos dados a cargo do *Jet Propulsion Laboratory* (JPL). Refere-se ao levantamento topográfico por radar interferométrico efetuado entre 11 e 22 de fevereiro de 2000 a bordo do ônibus espacial Endeavour, em altitude nominal de 233 km e ajustes orbitais diários. Este levantamento teve como objetivo a geração do mais acurado e completo modelo digital de elevação entre as latitudes 60° norte e 57° sul (Rabus *et al* 2003).

Os arquivos digitais para a geração de modelos digitais de elevação estão disponíveis no endereço <ftp://ftp.glcf.umiacs.umd.edu/glcf/SRTM/WRS2/>, na forma de arquivos digitais individuais que recobrem uma área de 1° por 1° no terreno. Estes dados utilizam o sistema de projeção geodética (grau/min/seg) e *datum* WGS 84, possuem resolução espacial de 90 m e resolução radiométrica de 16 bits.

As aplicações envolvendo os dados SRTM são de naturezas diversas, sejam elas militares, civis ou

para usuários da comunidade científica. Gratuidade, acurácia e grande cobertura são as principais vantagens em sua utilização.

Estes dados, no entanto, apresentam alguns inconvenientes, como valores espúrios (positivos e negativos) próximos ao mar e outros corpos d'água e áreas com ausência de valores (Barros 2005). Na tentativa de se delimitar melhor os corpos d'água e linhas costeiras e eliminar *spikes* e *wells*, foram feitas correções nestes dados pela *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), disponibilizados com a denominação de *Version 2*.

### 3.5 – AS ORTOFOTOCARTAS

Ortofotocartas são imagens fotográficas onde as feições são apresentadas em suas verdadeiras posições sendo, portanto, geometricamente equivalentes a um mapa de linhas e de símbolos. Nesse tipo de imagens podem ser realizadas, diretamente, medidas de posição, distâncias, ângulos horizontais e áreas (Porfírio 2005).

Na presente pesquisa foram utilizadas ortofotocartas produzidas para o Instituto de Colonização e Reforma Agrária – INCRA, através do Projeto de Desenvolvimento do Sistema Fundiário Nacional, em acordo com o Governo Federal e o Banco Mundial.

Foram utilizadas oito ortofotocartas de números 217803, 217805, 217813, 217814, 217815, 217824, 217825, 217835, em escala de 1:10.000, com 1.3 m de resolução espacial e curvas de nível com 10 m de equidistância. Estas ortofotocartas utilizam a Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Sistema Geodésico Brasileiro, com meridiano central 45° WGR e elipsóide de referência UGGI 1967, *datum* horizontal Vértice Chuá (MG) e *datum* vertical Marégrafo de Imbituba (SC).

A cobertura aerofotogramétrica foi realizada em junho de 1987 pela empresa Aerofoto, sendo que o projeto de mapeamento e a restituição foram realizados entre setembro de 1990 e setembro de 1991. O mosaico constituído recobre o cânion principal do rio Peruaçu e adjacências, vindo a facilitar sobremaneira a localização de cavernas e sítios arqueológicos.

Estas ortofotocartas foram disponibilizadas pela Sociedade Excursionista e Espeleológica – S.E.E. e pelo Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas – G.B.P.E., sendo tomadas como referência para o posterior registro das imagens Landsat7 ETM+ e ASTER.

## **3.6 – ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA**

### **3.6.1 – INTRODUÇÃO**

A espectroscopia de reflectância é uma técnica que tem a função de medir, em diferentes comprimentos de onda, a energia eletromagnética refletida de uma superfície analisada, em relação à energia nela incidente, e representá-la na forma de um gráfico, que é conhecido como curva de reflectância espectral (Meneses *et al* 2001).

O conhecimento acerca do comportamento de um material imageado em relação aos fenômenos de absorção, reflexão e emissão da REM permite analisar a composição química/molecular dos objetos estudados (Alvarenga 2003), servindo de referência para a extração de informações contidas em imagens multi ou hiperespectrais de sensoriamento remoto. A caracterização espectral de minerais e rochas tem por objetivo obter informação composicional, complementar à informação morfológica/estrutural que os mapas fotogeológicos geralmente provêm (van der Meer 1996).

Esta técnica de análise é rápida, de baixo custo, não-destrutiva, não exige preparação das amostras e é utilizada para gerar espectros de referência para construção de biblioteca espectral a ser usada em processos de classificação de imagens multi ou hiperespectrais.

Uma desvantagem desta técnica é que ela é muito sensível a pequenas mudanças na química ou estrutura dos materiais, sendo que estas variações às vezes ocasionam deslocamentos na posição e forma das bandas de absorção no espectro. Considerando a vasta variedade na composição química dos materiais tipicamente encontrados no mundo real, assinaturas espectrais podem se tornar bastante complexas (Clark 1999 *in* Rencz 1999).

### 3.6.2 – COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE MINERAIS E ROCHAS

O espectro de uma rocha é o resultado da combinação da assinatura espectral de seus minerais constituintes, podendo ocorrer variações conforme varia a proporção relativa dos mesmos. Cada mineral ou rocha exibe um padrão de comportamento de reflectância que lhe é característico. Porém, em uma amostra, nem todos os constituintes minerais de uma rocha poderão ser caracterizados espectralmente num intervalo específico do espectro eletromagnético uma vez que existem minerais que não exibem feições espectrais características ou diagnósticas.

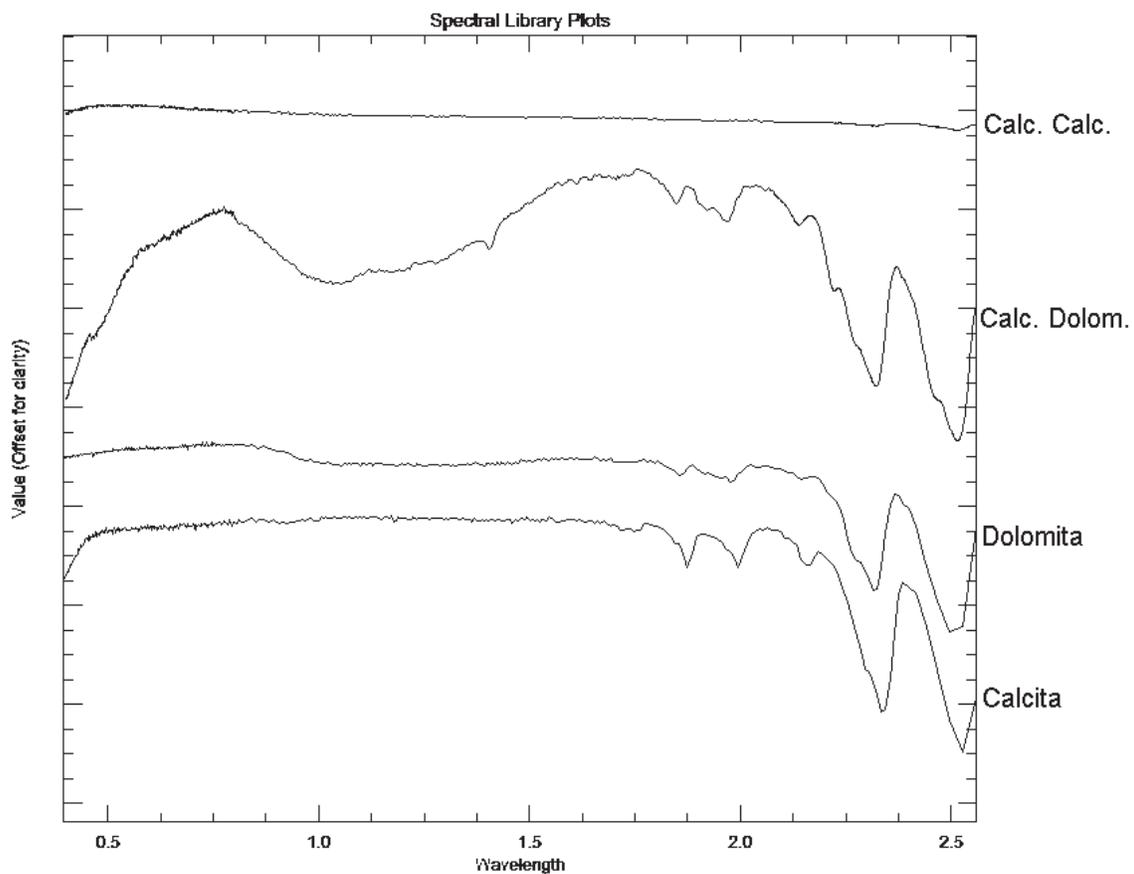
Os fatores macroscópicos que mais influenciam a reflectância de amostras de materiais coletados estão relacionados às características físicas e texturais da superfície analisada, como o arranjo textural dos elementos, forma, tamanho, estrutura e ainda granulometria, esfericidade e compactação dos grãos. A quantidade de luz espalhada ou absorvida por um grão é dependente do seu tamanho, sendo que os espectros de amostras de grãos finos são idênticos nas feições comparadas às amostras de rocha, apenas aumentando a intensidade dos espectros. A diminuição do tamanho das partículas, em geral, é acompanhada de um aumento de albedo (Meneses *et al* 2001). O número de feições, suas formas, posições e intensidades relativas não são afetadas (Gaffey 1986).

Em geral, rochas sedimentares de natureza clástica ou detrítica (conglomerados, arenitos, siltitos e argilitos), química (calcários e evaporitos) ou de natureza orgânica (carbonosas), apresentam espectros com alto albedo e feições bem definidas, à exceção quando da presença de material carbonoso. As variações desses espectros são limitadas em sua origem a um número reduzido de feições espectrais por causa da água, da hidroxila, do carbonato e dos óxidos.

Carbonatos de origem química ou detrítica apresentam feições características próximas a 2.35  $\mu\text{m}$  e entre 2.5 - 2.6  $\mu\text{m}$ . Os calcários calcíticos puros apresentam feições intensas em 2.335 e além de 2.5  $\mu\text{m}$ , enquanto calcários dolomíticos apresentam feições bem definidas e intensas em 2.0 e 2.32  $\mu\text{m}$  (Figura 3.1). Essas rochas apresentam eventualmente feições de absorção em 1.0  $\mu\text{m}$ , devido à presença de íon ferroso que substitui o  $\text{Mg}^{2+}$  na dolomita.

Os minerais calcita e dolomita apresentam ao menos sete feições de absorção entre 1.6 e 2.55  $\mu\text{m}$ . O

espectro da calcita apresenta feições relacionadas a processos vibracionais, centradas em 1.76, 1.87, 1.98, 2.17, 2.25, 2.33 e 2.53  $\mu\text{m}$ . A dolomita apresenta feições em 1.73, 1.86, 1.97, 2.16, 2.23, 2.31 e 2.5  $\mu\text{m}$ . A calcita pura apresenta uma feição centrada em 2.332  $\mu\text{m}$ , enquanto a dolomita é centrada em 2.31  $\mu\text{m}$  (Figura 3.1). Destacam-se ainda feições subordinadas para a calcita, centradas em 1.845, 1.965, 2.114 e 2.402  $\mu\text{m}$  que, no entanto, podem ser mascaradas pela presença de água na forma de inclusões fluidas.



**Figura 3. 1: Espectros de calcário calcítico (Calc. Calc.), calcário dolomítico (Calc. Dolm.), dolomita e calcita provenientes da biblioteca espectral da USGS mostrando as feições de absorção destes materiais**

Em geral, as bandas do espectro de dolomita estão centradas em comprimentos de onda um pouco mais curtos que as bandas equivalentes ao espectro da calcita, exibindo feições deslocadas entre 0.02 a 0.03  $\mu\text{m}$  voltadas para os comprimentos de onda menores. Além disso, mostram muito maior variação nas larguras das bandas do que a calcita (Gaffey 1986).

Quando duplês (feições de absorção duplas) largos ocorrem próximos a 1.2  $\mu\text{m}$  em alguns espectros da calcita ou da dolomita, significa que há presença de  $\text{Fe}^{2+}$ . Na calcita, o duplê é centrado em 1.3  $\mu\text{m}$ , enquanto que na dolomita é centrado em 1.2  $\mu\text{m}$ . Já a absorção em direção ao ultravioleta ocorre mais com os espectros da dolomita do que com os da calcita.

Ferro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) apresentam feições entre 0.4 e 1.1  $\mu\text{m}$ , região em que ocorrem transições eletrônicas. A predominância do Fe sobre os demais elementos de transição que ocorrem neste mesmo intervalo espectral deve-se, tanto à abundância, quanto à mobilidade deste elemento, o que o faz presente na maioria das rochas. O manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ) está presente em abundância em perfis de alteração supergênica de vários tipos de rocha e solos e suas feições no VIS são comumente mascaradas pela presença de outros íons presentes no mineral, principalmente Fe. A agregação de Fe é comum, resultando em bandas de absorção largas e suaves em 0.8 - 0.9  $\mu\text{m}$  (Meneses *et al* 2001).

A água é a molécula que tem as feições vibracionais intermoleculares mais proeminentes no IR. Sempre que presente, duas feições de absorção são verificadas em 1.4 e 1.9  $\mu\text{m}$ . A presença conjunta destas duas feições diagnostica água, mas somente a presença em 1.4  $\mu\text{m}$  e ausência em 1.9  $\mu\text{m}$  indica a presença do íon hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) (Meneses *et al* 2001).

Hidroxilas fazem parte da estrutura de muitos minerais, tendo no SWIR a principal feição em 2.78  $\mu\text{m}$  (vibração fundamental), *overtones* de estiramento em 1.4  $\mu\text{m}$  e um segundo *overtone* em 0.95  $\mu\text{m}$ .

Próximo a 1.6  $\mu\text{m}$ , quase todos os minerais formadores de rocha não exibem feições de absorção. Neste ponto é verificado um pico de reflectância que assume a posição de um divisor entre a influência das bandas de transferência de carga do Fe no UV e as bandas de absorção fundamentais da hidroxila e água além de 2.5  $\mu\text{m}$  (Meneses *et al* 2001).

### 3.6.3 – MÉTODOS

A utilização da espectroscopia de reflectância teve como objetivo a caracterização espectral de amostras de rochas carbonáticas da área de estudo, através da geração de espectros de referência e

análise dos seus componentes mineralógicos. As amostras de rochas carbonáticas foram selecionadas de acordo com sua posição topográfica, contemplando diferentes altimetrias e um máximo de variação litofaciológica da coluna estratigráfica (Figura 3.11).

As medidas radiométricas foram obtidas em laboratório com o espectrorradiômetro FieldSpec FR PRO, que opera na faixa de 0.35 a 2.5  $\mu\text{m}$ , utilizando-se de fonte artificial de iluminação (lâmpada halógena de 3000° K de temperatura) e lente redutora do campo de visada de 5°, posicionada a uma distância de 20 cm do material alvo. O FieldSpec foi calibrado através de placa de referência (*Spectralon*). A leitura do material amostrado e coleta dos espectros foi efetuada com o auxílio de um *lap top* e *software* controlador, sendo que as medidas foram tomadas tanto na face alterada, quanto na face fresca das amostras.

Foram analisadas amostras provenientes de 16 sítios de coleta, perfazendo um total de 55 medidas. Os espectros de reflectância correspondentes às amostras mais representativas (10 amostras, 20 espectros) foram selecionados para a construção de uma biblioteca espectral de referência, visando à classificação espectral através da técnica *Spectral Angle Mapper* (SAM). As análises dos espectros foram feitas de forma empírica, tendo sido utilizado o *software* ENVI 4.2. Os espectros foram analisados, tanto no modo normal, como também com o *continuum* removido. A correção dos *gaps* dos espectros foi feita no *software* ASD ViewSpec PRO 4.02.

A descrição macroscópica<sup>1</sup> das amostras foi realizada com o auxílio de lupa manual de 10x de aumento e estereoscópio binocular com aumento de até 40x, além de tabelas de granulometria e carta de cores. Foi utilizada uma sistemática para descrição macroscópica, na seguinte ordem: litologia, composição qualitativa, coloração, textura, estruturas e outras observações, como presença de minerais secundários e tipo de fraturamento.

---

<sup>1</sup> A descrição macroscópica foi auxiliada pelo Prof. Msc. Cláudio M. T. da Silva, DEGEO/UFOP.

### 3.6.4 – DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA E INTERPRETAÇÃO ESPECTRO-MINERALÓGICA

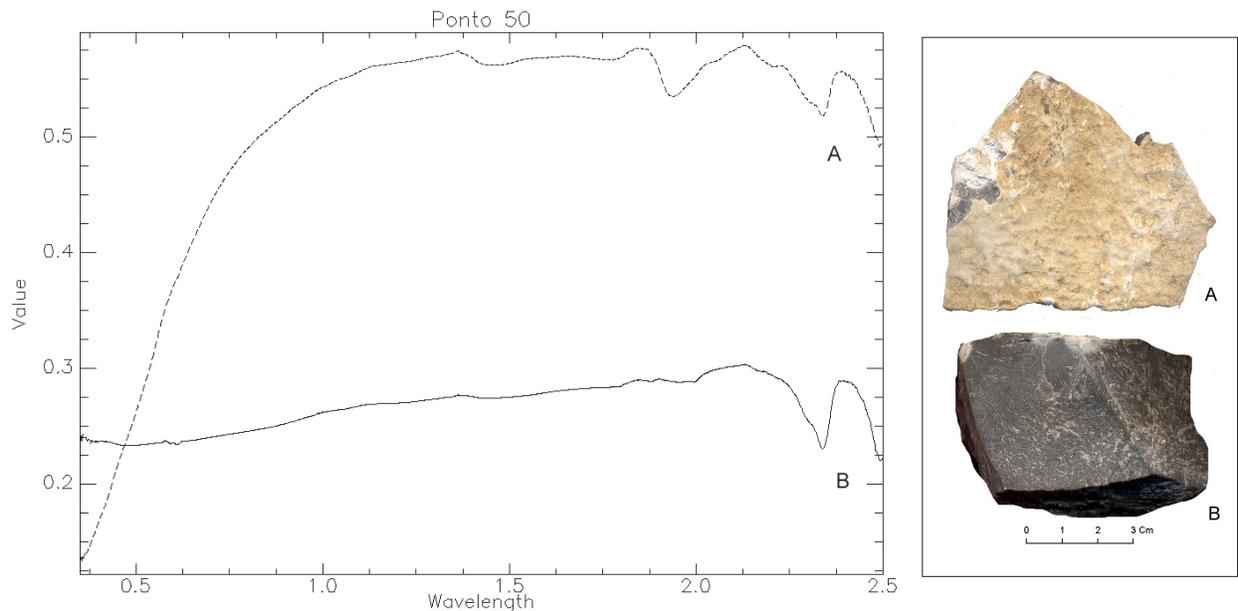
**Amostra P50:** coletada na base de maciço do extremo NE do PNCP, nas proximidades da Gruta do Cipó. Coordenadas 599640E e 8345082N, altitude de 463 m.

Descrição macroscópica: calcário calcítico, cinza escuro médio, criptocristalino, maciço, compacto e com fraturamento irregular a conchoidal. Faces corticais alteradas por intemperismo da rocha e recobrimento por líquen (Figura 3.2).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 046** (face alterada): possui forte absorção em 2.33 e 1.94 e absorção fraca em 2.2, 1.76 e 1.46  $\mu\text{m}$ , próprias do  $\text{CaCO}_3$ . As feições de absorção em 1.93, 1.46  $\mu\text{m}$  são devidas ao conteúdo de  $\text{H}_2\text{O}$ , enquanto as feições de absorção em 0.61 e 0.47  $\mu\text{m}$  advêm de pigmentos, ambos provenientes da cobertura de líquen. A presença de argilo-minerais é atestada pelas feições em 2.2  $\mu\text{m}$ .

- **Espectro 047** (face fresca): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica, responsável pela coloração cinza escuro da amostra. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.49 e 2.33, e muito fracas em 2.17, 1.99, 1.88, 1.79, 1.42  $\mu\text{m}$ , devidas ao  $\text{CaCO}_3$ .



**Figura 3.2: Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P50, face fresca (linha contínua) e alterada (linha tracejada)**

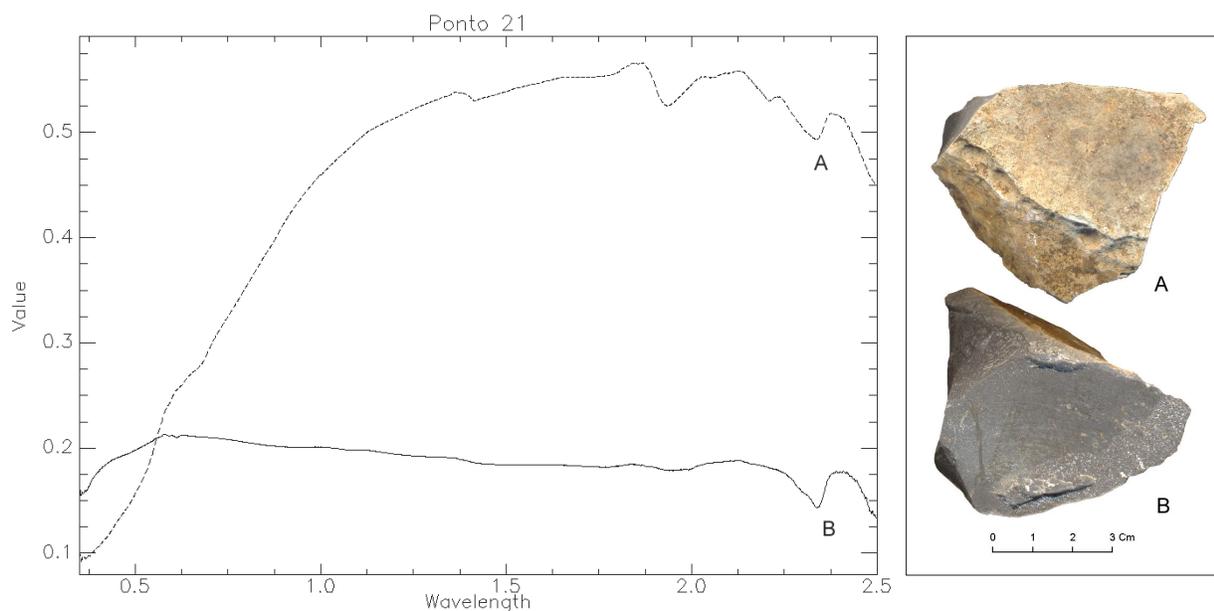
**Amostra P21:** coletada na face leste do maciço, cerca de 1 Km após a entrada do PARNA, ao lado da estrada. Coordenadas 582525E e 8324185N, altitude de 560 m.

Descrição macroscópica: calcário calcítico, cinza escuro médio, criptocristalino, maciço, compacto e com fraturamento irregular a conchoidal (Figura 3.3).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 030** (face fresca): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica, responsável pela coloração cinza escuro da amostra. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.50, 2.33, 1.93, 1.76 e 1.46  $\mu\text{m}$  e fraca em 1.88  $\mu\text{m}$ , devidas ao  $\text{CaCO}_3$ .

- **Espectro 031** (face alterada): verificadas fortes absorções em 2.47, 2.33, 1.93, 1.42, 0.67 e 0.43  $\mu\text{m}$  devidas ao  $\text{CaCO}_3$ . Feições fracas são observadas em 2.2, 1.77 e 1.0  $\mu\text{m}$ . As feições de absorção em 2.20  $\mu\text{m}$  são características de argilo-minerais. As feições de absorção em 1.93, 1.42  $\mu\text{m}$  são devidas ao conteúdo de  $\text{H}_2\text{O}$ , enquanto as feições em 0.67 e 0.47  $\mu\text{m}$  advêm de pigmentos, ambas provenientes da cobertura de líquen.



**Figura 3.3:** Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P21, face fresca (linha contínua) e alterada (linha tracejada)

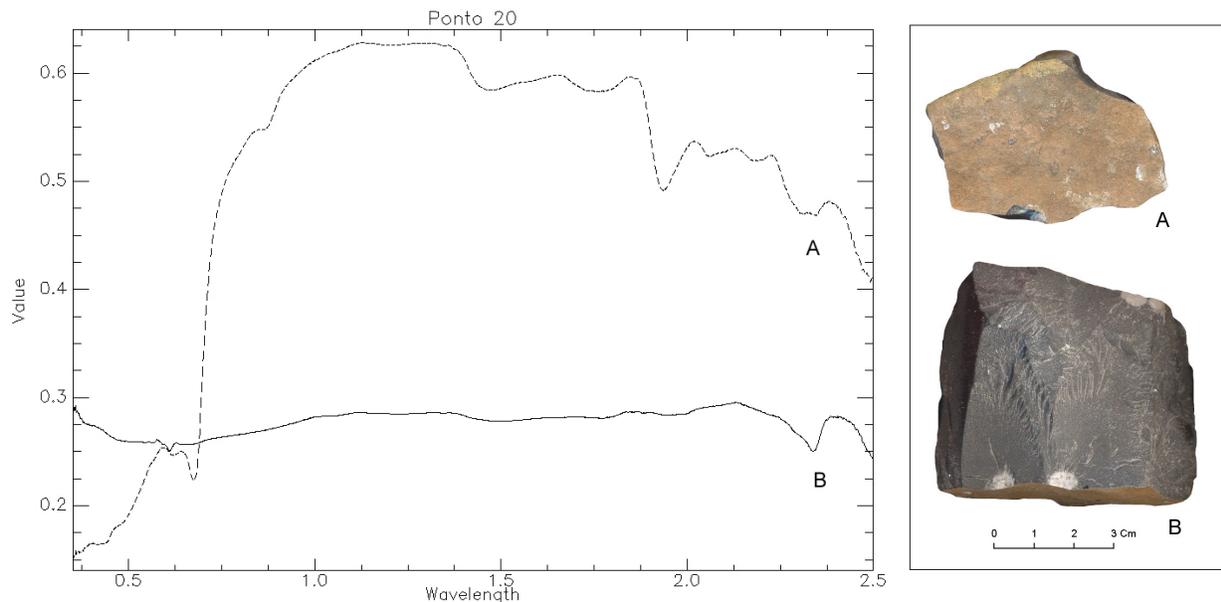
**Amostra P20:** coletada na face norte do maciço, nas proximidades do estreitamento do cânion, conhecido como boqueirão. Coordenadas 581491E e 8325380N, altitude de 590 m.

Descrição macroscópica: calcário calcítico, cinza escuro, criptocristalino, maciço, compacto e com fraturamento irregular a conchoidal. Presença de estruturas estilólíticas milimétricas de cor negra devido à presença de insolúveis de origem orgânica (Figura 3.4).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 025** (face fresca): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.50, 2.33  $\mu\text{m}$  e fracas em 1.95, 1.88, 1.76 e 1.49  $\mu\text{m}$ , devidas ao  $\text{CaCO}_3$ .

- **Espectro 026** (face alterada): verificadas fortes absorções em 2.5, 2.33, 1.93, 1.75, 1.45, 0.87 (esta devida à presença de Fe), devidas ao  $\text{CaCO}_3$  e 0.67 e 0.44  $\mu\text{m}$  devidas à presença de líquen. Feições fracas são observadas em 2.17 e 2.05  $\mu\text{m}$ , comuns à Alunita e à Pirofilita .



**Figura 3.4:** Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P20, face fresca (linha contínua) e alterada (linha tracejada)

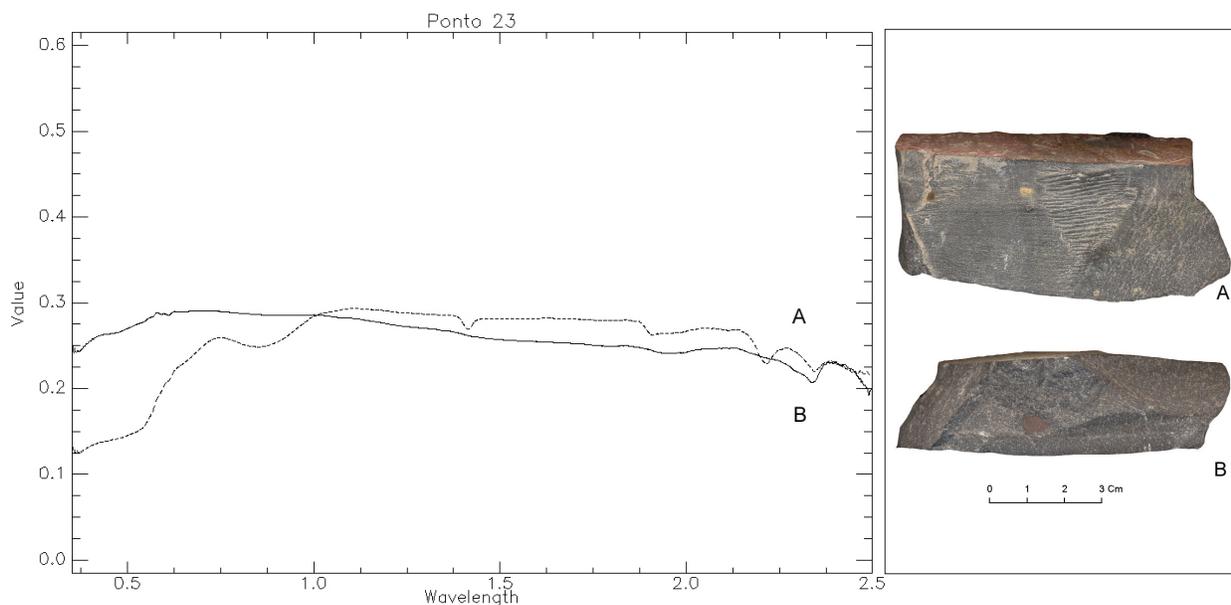
**Amostra P23:** coletada na face oeste do maciço, a leste da estrada. Coordenadas 581137E e 8325925N, altitude de 600 m.

Descrição macroscópica: calcário calcítico, cinza amarronzado, criptocristalino, com estruturas plano-paralelas e com fraturamento irregular a conchoidal. Verificada superfície de oxidação de coloração marrom, tanto na face fresca, quanto alterada (Figura 3.5).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 049** (face fresca): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.49, 2.33 e 1.94  $\mu\text{m}$  e fracas em 1.76  $\mu\text{m}$  devidas ao  $\text{CaCO}_3$  e 0.87  $\mu\text{m}$ , devida à presença de Fe.

- **Espectro 051** (face alterada): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.50, 2.44, 2.345, 2.215, 1.91, 1.41  $\mu\text{m}$  e fracas em 1.86, 1.77, 1.49 e 0.61  $\mu\text{m}$ . Uma absorção larga em 0.87  $\mu\text{m}$  atesta a existência de Fe, enquanto absorções em 2.44 e 2.215  $\mu\text{m}$  atestam a ocorrência de minerais recobrendo a parte alterada da amostra.



**Figura 3.5:** Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P23, face fresca (linha contínua) e alterada (linha tracejada)

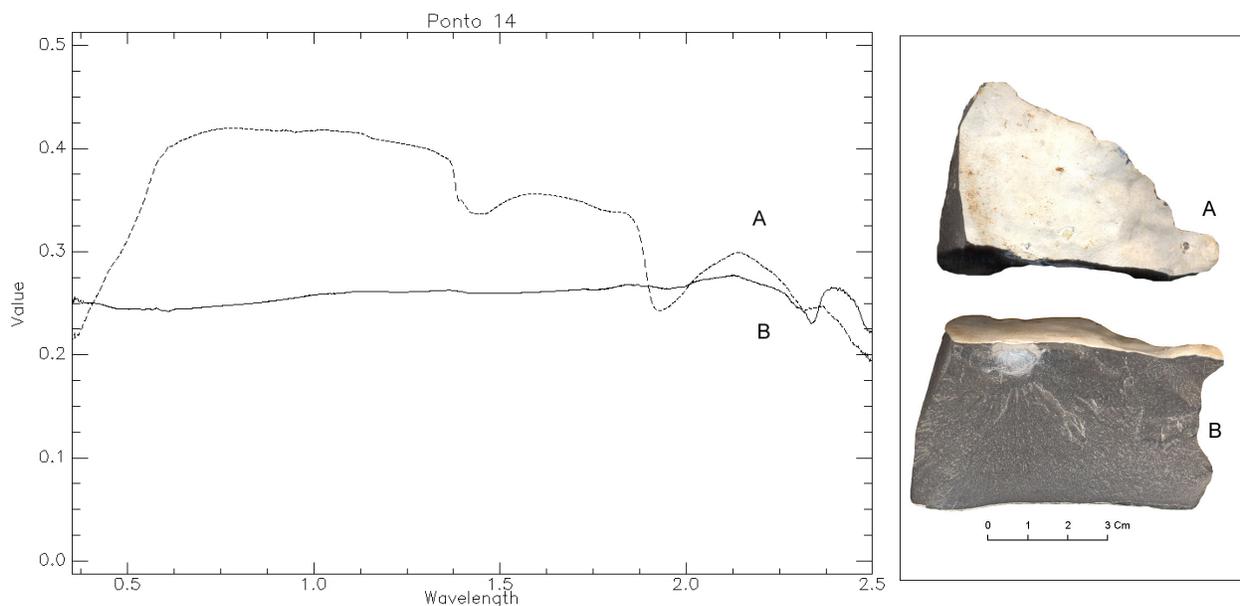
**Amostra P14:** amostra coletada no interior da Gruta Janelão, junto a um gotejamento do teto. Coordenadas 581750E e 8327837N, altitude de 620 m.

Descrição macroscópica: calcário calcítico, cinza médio escuro, criptocristalino, com estruturas plano-paralelas e com fraturamento irregular a conchoidal. Observa-se superfície estilolítica incipiente. A face alterada está recoberta com escorrimento de cor branca, de espessura milimétrica, devido a gotejamento (Figura 3.6).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 018** (face fresca): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.49, 2.33 e 1.94  $\mu\text{m}$  e fracas em 1.88 e 1.77  $\mu\text{m}$ , devidas ao  $\text{CaCO}_3$ .

- **Espectro 020** (face alterada): possui um alto de reflectância devido ao fato desta face estar recoberta por deposição química (espeleotema). Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.50, 2.45, 2.31, 1.92 e 1.42  $\mu\text{m}$  (as duas últimas devidas à presença de  $\text{H}_2\text{O}$ ) e fracas em 1.77  $\mu\text{m}$ . A feição de absorção em 2.31  $\mu\text{m}$ , característica da dolomita, explica-se pelo fato desta amostra estar recoberta por espeleotema oriundo do gotejamento do teto da cavidade, que coincide com a litofácies do topo da formação carbonática, ou seja calcário dolomítico.



**Figura 3.6:** Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P14, face fresca (linha contínua) e com deposição química (linha tracejada).

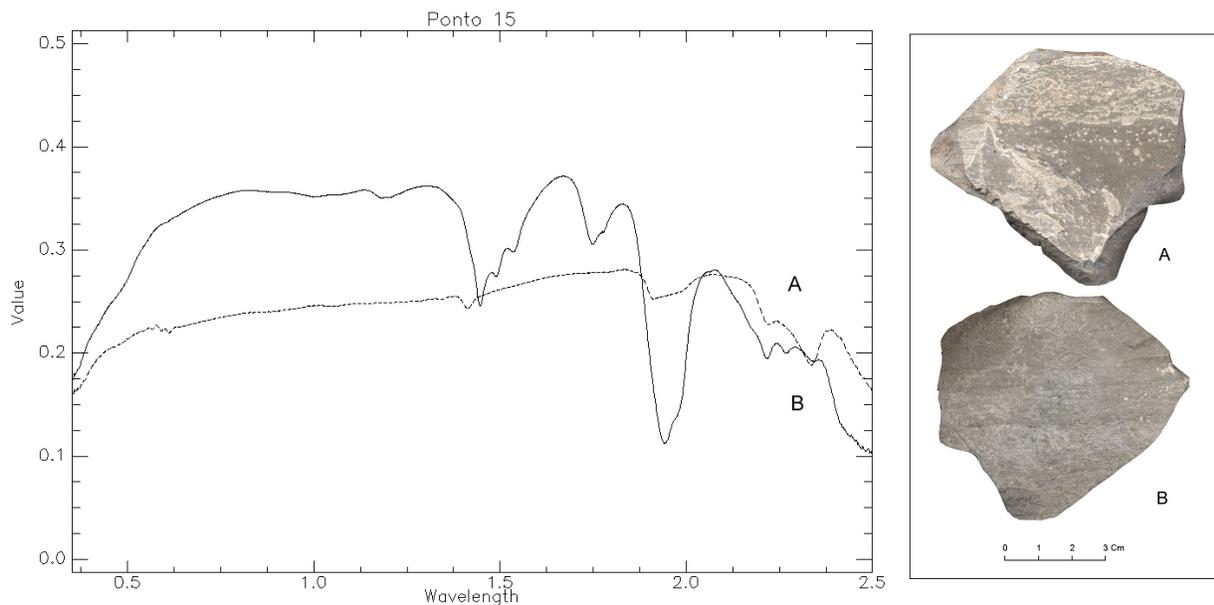
**Amostra P15:** amostra coletada na parede esquerda no interior da Gruta Janelão. Coordenadas 581753E e 8327718N, altitude de 640 m.

Descrição macroscópica: calcário calcítico, cinza médio claro, microcristalino, com estruturas paralelo-onduladas, estrutura pisolítica deformada lenticular (13 mm x 5 mm) e com fraturamento irregular a conchoidal (Figura 3.7).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 020** (face fresca): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.5, 2.33, 1.91 e 1.41  $\mu\text{m}$  e fraca em 1.78  $\mu\text{m}$  (devidas ao  $\text{CaCO}_3$ ). A absorção em 2.22  $\mu\text{m}$  é característica de argilo-minerais.

- **Espectro 021** (face alterada): absorções mais acentuadas são verificadas em 2.5, 2.44, 2.33, 2.21, 1.94 e 1.75  $\mu\text{m}$  (devidas ao  $\text{CaCO}_3$ ) e fracas em 2.26, 2.17 e 1.2  $\mu\text{m}$ . São verificadas feições triplas em 2.33, 2.26 e 2.18  $\mu\text{m}$  e 1.53, 1.49 e 1.44  $\mu\text{m}$ . Estas feições caracterizam o mineral Gipsita, que recobre a face alterada da amostra.



**Figura 3.7:** Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P15, face fresca (linha contínua) e face alterada (linha tracejada).

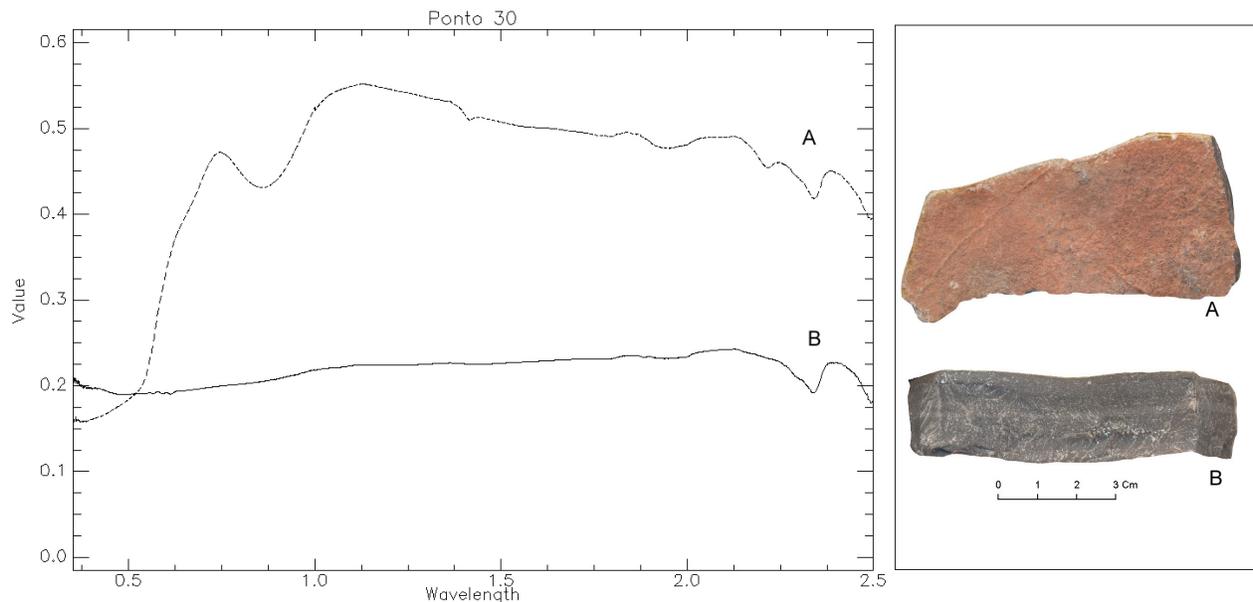
**Amostra P30:** amostra coletada em afloramento de torres residuais. Coordenadas 577908E e 8331360N, altitude de 700 m.

Descrição macroscópica: calcário calcítico, cinza amarronzado claro, microcristalino, com estratificações plano-paralelas e superfície estilolítica milimétrica com material argiloso. Observa-se um nível milimétrico de calcita recristalizada de cor preta. Superfície alterada, recoberta com material argiloso e oxidado, de coloração marrom claro (Figura 3.8).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 039** (face fresca): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.5, 2.33 e 1.95  $\mu\text{m}$  e fracas em 1.88 e 1.78  $\mu\text{m}$ , devidas ao  $\text{CaCO}_3$ .

- **Espectro 041** (face alterada): absorções mais acentuadas são verificadas em 2.49, 2.33, 2.21, 1.94 e 0.52  $\mu\text{m}$  e fracas em 1.87, 1.78 e 1.41  $\mu\text{m}$ . Ocorre uma absorção larga em 0.87  $\mu\text{m}$  devido a presença de Fe que recobre a amostra, ocasionando queda acentuada em direção ao azul. A absorção em 2.22  $\mu\text{m}$  é devida à presença de argilo-minerais.



**Figura 3.8:** Espectros de amostra de calcário calcítico do ponto P30, face fresca (linha contínua) e alterada (linha tracejada)

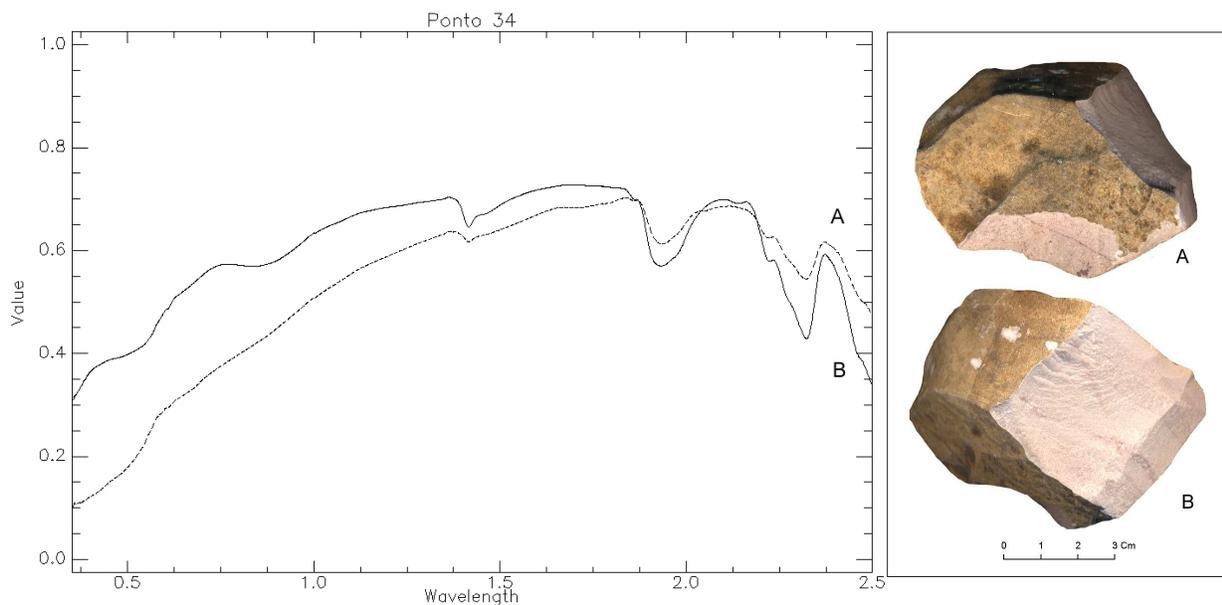
**Amostra P34:** amostra coletada próximo à área da Mineração Peruaçu. Coordenadas 571906E e 8331360N, altitude de 707 m.

Descrição macroscópica: calcário dolomítico, de coloração rosa claro, microcristalino, com estratificações plano-paralelas que se distinguem pela maior concentração de minerais ferruginosos oxidados, de coloração marrom-escura (Figura 3.9).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 042** (face fresca): absorções mais acentuadas são verificadas em 2.59, 2.32, 2.22, 1.93, 1.41 e 0.53  $\mu\text{m}$  e fracas em 2.14, 1.86, 1.74 e 1.45  $\mu\text{m}$ . Ocorre uma absorção larga em 0.88  $\mu\text{m}$  devido à presença de Fe.

- **Espectro 045** (face alterada): absorções mais acentuadas são verificadas em 2.50, 2.32, 1.932 e 1.41  $\mu\text{m}$  e fracas em 2.21, 1.86, 1.72, 1.41, 1.00, 0.68, 0.48 e 0.43  $\mu\text{m}$ . Ocorre uma absorção larga em 0.87  $\mu\text{m}$  devido a presença de Fe. Feições em 0.44, 0.68 e 1.0  $\mu\text{m}$  são devidos à presença de líquen. Absorção em 2.22  $\mu\text{m}$  devido à presença de argilo-minerais.



**Figura 3.9: Espectros de amostra de calcário dolomítico do ponto P34, face fresca (linha contínua) e alterada (linha tracejada)**

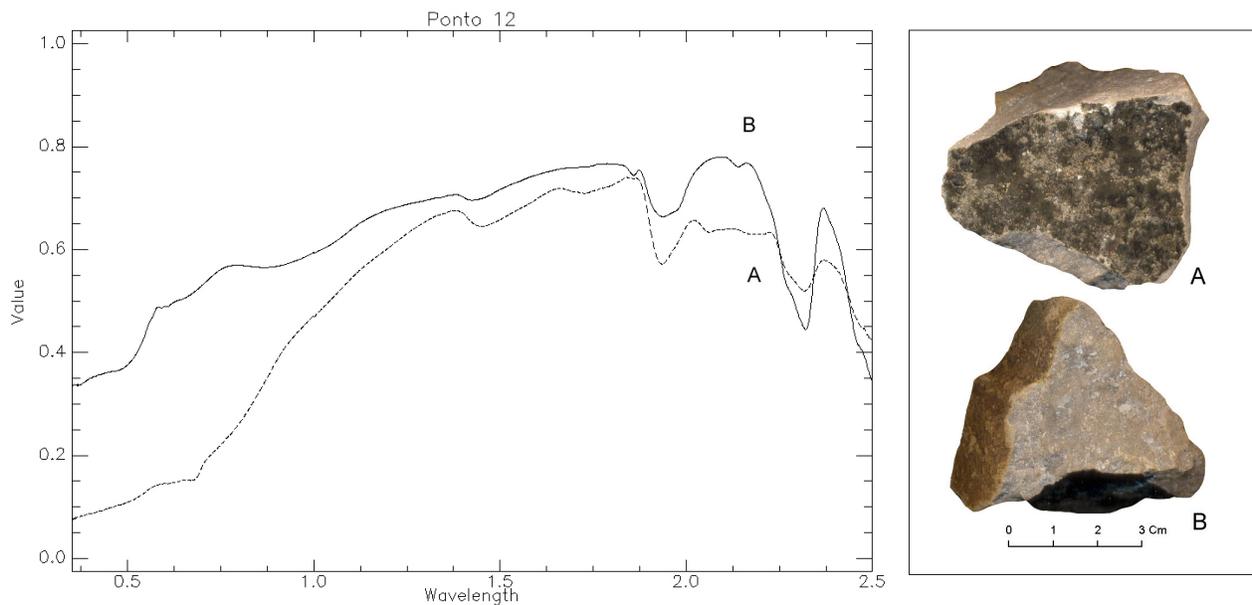
**Amostra P12:** amostra coletada em afloramentos do alto da Dolina dos Macacos. Coordenadas 581496E e 8327858N, altitude de 720 m.

Descrição macroscópica: calcário dolomítico, de coloração cinza rosado, grosseiramente cristalino, com estratificações plano-paralelas e níveis milimétricos de calcita recristalizada. Face alterada recoberta por líquen (Figura 3.10).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 013** (face fresca): absorções mais acentuadas são verificadas em 2.50, 2.45, 2.32, 1.94  $\mu\text{m}$  e fracas em 2.14, 1.97, 1.85, 1.74, 1.44  $\mu\text{m}$ . Ocorre uma absorção larga em 0.87  $\mu\text{m}$  devido à presença de Fe. Um dublê é observado em 0.61  $\mu\text{m}$ .

- **Espectro 015** (face alterada): absorções mais acentuadas são verificadas em 2.50, 2.31, 1.93 e 1.41  $\mu\text{m}$  e fracas em 2.15, 2.05, 1.85, 1.73, 0.68 e 0.51  $\mu\text{m}$ . Feições em 0.51 e 0.68  $\mu\text{m}$  são devidas à presença de líquen.



**Figura 3.10:** Espectros de amostra de calcário dolomítico do ponto P12, face fresca (linha contínua) e alterada (linha tracejada)

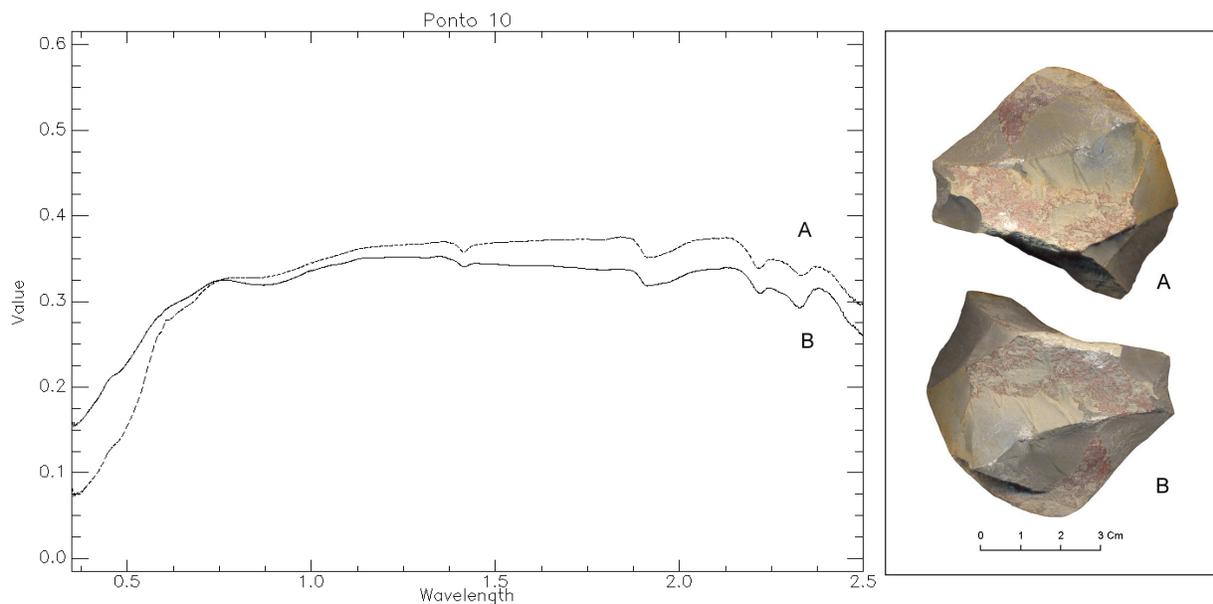
**Amostra P10:** amostra coletada em afloramento próximo à estrada de acesso à propriedade do Sr. Joaquim Taquaril. Coordenadas 582787E e 8327966N, altitude de 745 m.

Descrição macroscópica: calcário dolomítico, cinza médio, criptocristalino, maciço, com fraturamento irregular a conchoidal. São observadas superfícies com deposição de material ferruginoso oxidado, de coloração marrom-avermelhada (Figura 3.11).

Interpretação Espectro-mineralógica:

- **Espectro 008** (face fresca): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.5, 2.32, 2.21 e 1.91 e 1.41  $\mu\text{m}$  e fracas em 1.85, 1.78 e 1.41  $\mu\text{m}$ . Ocorre uma absorção larga em 0.87  $\mu\text{m}$  devido à presença de Fe. Nota-se a queda acentuada em direção ao azul. A absorção em 2.21  $\mu\text{m}$  é devida à presença de argilo-minerais.

- **Espectro 009** (face alterada): possui valores baixos de reflectância devido à presença matéria orgânica. Absorções mais acentuadas são verificadas em 2.5, 2.32, 2.21, 1.91, 1.41, 0.41 e 0.48  $\mu\text{m}$  e fraca em 0.68  $\mu\text{m}$ . Ocorre uma absorção larga próxima a 0.88  $\mu\text{m}$  devido à presença de Fe. Nota-se a queda acentuada em direção ao azul. A absorção em 2.21  $\mu\text{m}$  é devida a presença de argilo-minerais.



**Figura 3.11: Espectros de amostra de calcário dolomítico do ponto P10, face fresca (linha contínua) e alterada (linha tracejada)**

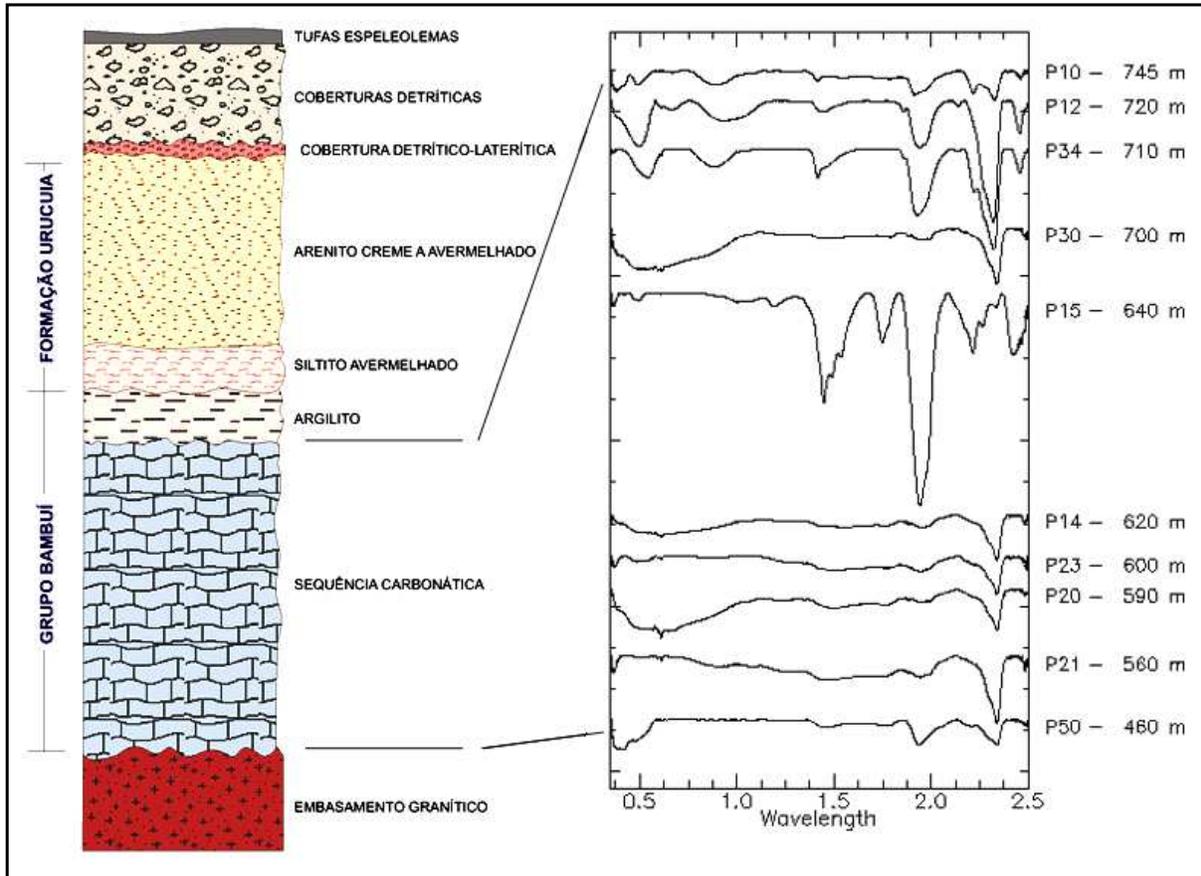


Figura 3.12: Detalhamento da coluna estratigráfica (IBAMA 2005, modif.) a partir da interpretação espectro-mineralógica das diversas litofácies amostradas

### 3.7 – PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS: VNIR E SWIR

#### 3.7.1 – INTRODUÇÃO

O processamento digital de imagens de SR teve como finalidades a discriminação litológica e litofaciológica, extração de índices de vegetação, geração de modelos digitais de elevação e filtragens direcionais voltadas à extração de lineamentos.

Segundo Crósta (1992), a função primordial do PDI é a de facilitar a identificação e a extração de informações contidas nas imagens de sensoriamento remoto para posterior interpretação, valendo-se de ferramentas contidas em sistemas dedicados.

Na presente pesquisa, foram utilizadas imagens multiespectrais dos sensores ASTER e ETM+, dados SRTM e ortofotos.

### 3.7.2 – PRÉ-PROCESSAMENTO

Erros no processo de aquisição podem degradar a qualidade das imagens coletadas por sensores remotos. Estes podem ser internos, provenientes do próprio sensor, em geral sistemáticos ou estacionários, ou externos, devido à perturbação da plataforma e modulação atmosférica (Jensen 1995). As falhas na aquisição dos dados se traduzem em distorções radiométricas ou geométricas que exigem a correção prévia, por meio de técnicas de processamento das imagens.

#### 3.7.2.1 – Correção Atmosférica

A radiação solar é seletivamente espalhada e absorvida pela atmosfera terrestre devido a gases e aerossóis, sendo que a soma dessas duas formas de perda de energia é denominada de atenuação atmosférica. O efeito de espalhamento dos gases, conhecido como espalhamento molecular ou Rayleigh, afeta principalmente os comprimentos de onda do visível, efeito esse que vai progressivamente sendo reduzido acima de 1.0  $\mu\text{m}$ . O espalhamento por aerossóis, chamado também de “Espalhamento de Mie”, decresce com o aumento do comprimento de onda e seu efeito é minimizado acima de 1.0  $\mu\text{m}$ .

Além destes, parte da energia espalhada pode ser dirigida diretamente ao sensor, sem ter interagido com os alvos na superfície terrestre. Esse ruído, denominado de *path radiance*, causa um efeito aditivo no sinal detectado pelo sensor, sem que tenha um significado espectral relacionado aos materiais superficiais (Drury 1993).

A atenuação atmosférica acarreta a diminuição da faixa de valores digitais possíveis registrados pelo sensor, diminuição do contraste entre superfícies adjacentes e alteração no brilho da imagem, parâmetros para a obtenção de um modelo de absorção e espalhamento atmosférico que inclui modelos específicos para regiões tropicais, além de possibilitar a conversão dos dados de radiância para reflectância aparente.

Os procedimentos adotados se iniciam com a utilização do *software* Cross Talk para a redução do efeito *cross-talk* das bandas do SWIR do ASTER, causada pela dispersão indevida de energia no detector da Banda 4 desse sensor, energia essa que acaba atingindo indevidamente o detector de outras bandas

(notadamente a Banda 9). Seguiu-se a conversão das bandas do VNIR e SWIR para o formato BIL e reamostragem das bandas do SWIR para 15 m, tornando-as espacialmente compatíveis com as bandas do VNIR. Por último, foi criada uma máscara objetivando o cálculo dos parâmetros estatísticos da cena e foi executada a correção atmosférica. A correção radiométrica foi executada utilizando-se o modelo atmosférico US-Standard, uma vez que os valores das médias pluviométricas (1042 mm) são as que mais se aproximam da área de estudo.

A correção radiométrica do sensor ETM+ foi feita através do método *Internal Average Relative Reflectance* – IARR, que calcula um espectro médio para toda a cena e o usa como espectro de referência, sendo dividido pelo espectro de cada pixel da imagem. Este método foi empregado como alternativa, devido a problemas na utilização do FLAASH para este sensor.

### 3.7.2.2 – Correção Geométrica

Os procedimentos para registro e correção geométrica se iniciaram com os processos de rasterização (com resolução de 300 dpi) e geo-referenciamento do conjunto de oito ortofotocartas, posteriormente mosaicadas em um único arquivo no formato GeoTif.

O geo-referenciamento de cada ortofotocarta foi feito a partir de seis pontos de controle e foi baseado no modelo de correção polinomial de primeira ordem, que resultou num erro RMS de aproximadamente 1 m, menor que a dimensão de um pixel (1.27 m). Este mosaico serviu de referência para a correção geométrica das imagens Landsat e ASTER.

As imagens multiespectrais ASTER e ETM+ tiveram seu *datum* convertido de WGS84 para SAD69, com a finalidade de permitir o registro para com o mosaico de ortofotocartas.

A etapa seguinte foi o geo-referenciamento da cena ASTER a partir de três pontos de controle provenientes do mosaico de ortofotos e de três pontos notáveis levantados em campo com GPS. O resultado apresentou um erro quadrático médio de 13.5 m, inferior a um pixel.

O registro da cena 219/070 do Landsat7 ETM+ foi feito a partir da cena ASTER, tendo apresentado um erro quadrático médio de 23.1 m, ou seja, menor que um pixel.

Após a correção geométrica, foi feito um corte demarcado nas imagens multiespectrais entre as

coordenadas 562000 a 605000 UTME e 8308000 a 8354000 UTMN de forma a destacar a área de interesse.

### 3.7.3 – TRANSFORMAÇÕES E REALCES ESPECTRAIS

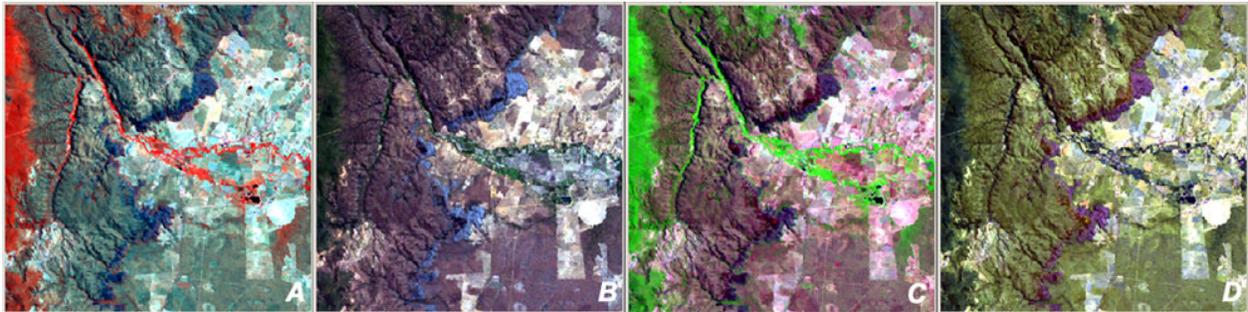
Foram testadas várias composições coloridas para as cenas dos sensores ETM+ e ASTER, sendo que a relação entre altos e baixos de refletância dos carbonatos foi um parâmetro utilizado para a seleção dos melhores tripletes. Para a cena Landsat7, as composições coloridas que apresentaram melhores resultados foram a 4R5G7B, que destacou a vegetação em vermelho, a 3R2G1B, que destacou os carbonatos em tons de azul, a 5R4G3B, que ressaltou a vegetação em verde, os calcários calcíticos em magenta e os calcários dolomíticos em tons de vermelho. A composição 7R5G2B também propiciou a discriminação litofaciológica, com os calcários calcíticos assumindo tons magenta e os calcários dolomíticos tons marrons (Figura 3.15).

As melhores composições coloridas da cena ASTER do ponto de vista da análise visual foram: 4R3G2B, que destacou a vegetação em verde, calcários dolomíticos em magenta, calcários calcíticos em azul, solos expostos em magenta; 5R1G3B, que destacou a vegetação em azul, solos expostos em tons laranja, calcários dolomíticos em laranja escuro, calcários calcíticos em amarelo e 3R2G4B que destacou a vegetação em magenta, calcários dolomíticos em azul, calcários calcíticos em verde e solos expostos em azul (Figura 3.14).

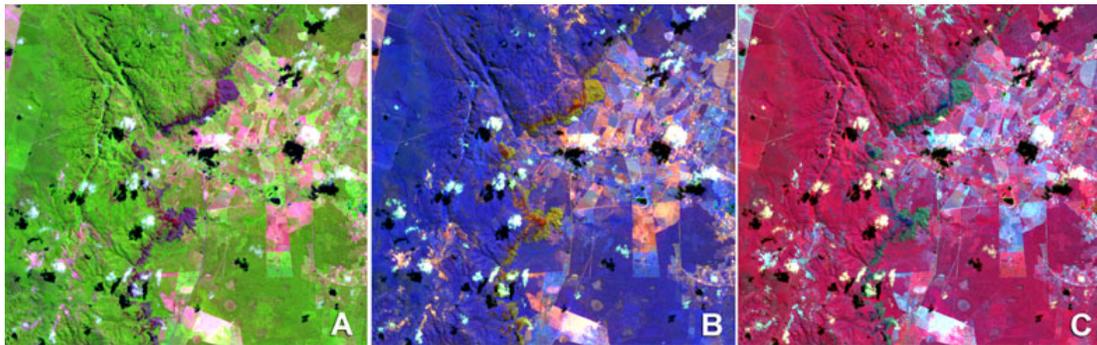
O aumento de contraste foi realizado em função da concentração de valores num intervalo relativamente pequeno dos tons de cinza possíveis, característica de imagens multiespectrais (Crósta 1992, Mather 1999). A técnica de aumento de contraste é uma operação subjetiva que pode ser altamente influenciada por preferências pessoais do operador (Sabins 1997). No presente estudo, foi utilizado o contraste linear com 2% de saturação (sendo 1% em cada extremidade do histograma), que se mostrou satisfatório para uma abordagem inicial, tanto para o sensor ETM+, quanto para o ASTER.

Forma alternativa ao espaço RGB, o espaço de cores HSI (*Hue, Saturation, Intensity*), é definido por três atributos - matiz, intensidade e saturação - que podem ser manipulados individualmente. Sua vantagem é apresentar as cores de forma mais próxima ao modo como é percebida

peelo sistema visual humano. Esta técnica foi utilizada nas imagens Landsat e ASTER, inicialmente convertendo um triplete para o sistema HSI, seguindo-se com a aplicação de aumento linear de contraste para expandir o intervalo de intensidade e saturação, finalizando com a reversão do resultado para o sistema RGB. O resultado obtido com a transformação HSI, em relação à percepção visual, foi considerado superior ao aumento linear de contraste de 2% de saturação (Figura 3.15), mesmo para tripletes de bandas pouco correlacionadas, como a composição ASTER 4R3G2B.



**Figura 3.13: Detalhe das composições coloridas do sensor ETM+, 4R5G7B (A), 3R2G1B (B), 5R4G3B (C) e 7R5G2B (D)**



**Figura 3.14: Detalhe das composições coloridas do sensor ASTER, 4R3G2B (A), 5R1GB3 (B) e 3R2G4B (C)**



**Figura 3.15 – Detalhe de composição colorida 4R3G2B de imagem ASTER (esquerda), com aumento linear de contraste de 2% (centro) e após transformação HSI (direita)**

Índices de vegetação são indicadores do crescimento e do vigor da vegetação verde e podem ser utilizados no diagnóstico de vários parâmetros, incluindo o Índice de Área Foliar, biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade (Meneses *et al* 2001).

Dos vários índices encontrados na literatura, destaca-se o *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI, sendo este um dos mais utilizados em SR. O NDVI se baseia nas bandas do infravermelho próximo (NIR) e vermelho (R), combinadas sob a forma de operações aritméticas entre as bandas<sup>1</sup>.

O NDVI foi utilizado nesta pesquisa como indicador secundário de litologias, uma vez que as variações nas fitofisiografias estão relacionadas diretamente ao substrato rochoso, enquanto a disponibilidade hídrica está relacionada ao incremento de biomassa (Arcoverde 2005, IBAMA 2005) e níveis de pigmentos.

A partir desses índices, podem ser ressaltadas características fisionômicas, quando são individualizados o porte e estrutura espacial (horizontal e vertical) de comunidades vegetais; ecológicas, quando são associados parâmetros ambientais à distribuição espacial das comunidades vegetais; e florísticas, quando são individualizadas as diferentes espécies que compõem as comunidades.

Os parâmetros que influenciam a reflectância espectral de folhas são a composição química, a fisiologia e a umidade interna, correspondentes aos intervalos do VIS, NIR e SWIR. Na região do visível, os pigmentos (clorofilas, carotenos e xantofilas) dominam a reflectância espectral, ocasionando absorção. No NIR, há pouca absorção e é considerável o espalhamento interno da folha, baixa absorção pela presença de água, sendo que a reflectância espectral é quase constante. No SWIR verifica-se a predominância da absorção pela água, suavemente em 1.1 e fortemente em 1.45, 1.95 e 2.7  $\mu\text{m}$ .

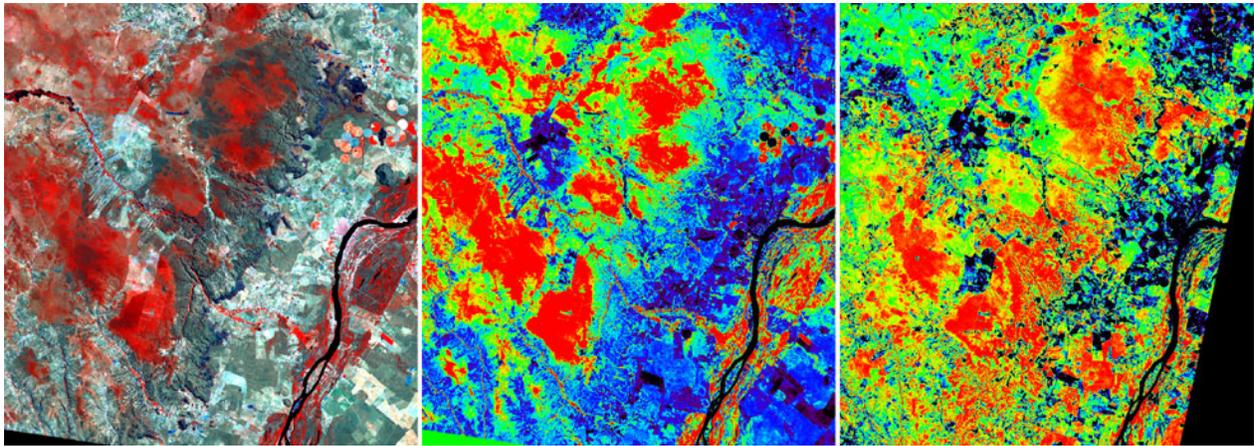
O solo também absorve e espalha a REM incidente, sendo que, quanto mais exposto o solo, menor IAF, maiores serão os valores de reflectância medidos na região do VIS.

Para a geração do NDVI, foram utilizadas as cenas do ETM+ e ASTER radiometricamente corrigidas. Após a geração dos índices, foi aplicada a paleta de cores *rainbow* e equalizados os

---

<sup>2</sup> NDVI =  $\frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}}$

histogramas, tomando-se uma composição colorida 4R5G7B ETM+ para efeito de comparação (Figura 3.16).



**Figura 3.16:** Índices de Vegetação (NDVI) sobre imagem ETM+ (centro) e ASTER (direita) comparados à composição colorida 4R5G7B do ETM+.

#### 3.7.4 – CLASSIFICAÇÃO ESPECTRAL – SAM

*Spectral Angle Mapper* (SAM) é uma técnica de classificação supervisionada de imagens hiperespectrais, que foi adaptada às imagens multiespectrais ASTER do presente trabalho. Esta técnica consiste em calcular a similaridade espectral entre espectros de referência e espectros de reflectância dos pixels da imagem, assumindo que a imagem está corretamente convertida para reflectância aparente. As similaridades dos espectros de referência e espectro dos pixels analisados são expressas em termos de ângulo médio, denominado ângulo espectral (Kruse *et al* 1990).

Os procedimentos para a classificação SAM se iniciaram com a geração de arquivo HDR com as bandas 1 a 9 reamostradas para 15 m, após o qual foi convertida para o formato BIL. Feitas as correções radiométricas, as imagens foram reamostradas de forma que os valores de reflectância assumissem o intervalo de 0 a 1. Foi aplicada uma máscara de forma a restringir o processamento somente à área com dados válidos.

A aplicação da técnica SAM foi realizada com o assistente *Spectral Hourglass Wizard*, no software ENVI 4.2, seguindo os conceitos de Boardman e Kruse (1994). A seqüência de procedimentos implementada por esse *Wizard* se inicia com a aplicação da técnica *Minimum Noise Fraction* (MNF), utilizada para reduzir a dimensionalidade dos dados e remoção de ruídos. Em seguida, é aplicada a técnica *Pixel Purity Index* (PPI),

que tem por finalidade determinar os pixels que representam materiais puros em relação a misturas espectrais. Esta identificação foi feita através de seleção, de forma interativa, em um diagrama de dispersão multidimensional. Os pixels considerados mais puros são os que se encontram dispersos nas extremidades do diagrama e podem ser assinalados pelos usuários (Lima 2003).

Ao se utilizar o *assistente Spectral Hourglass Wizard*, dois resultados foram obtidos: o primeiro se refere ao conjunto de imagens regradadas, denominadas *Rule Images*, havendo uma imagem regradada para cada espectro de referência utilizado; o segundo resultado é um mapa de classificação final, baseado na similaridade espectral dos pixels da imagem com os materiais de referência previamente selecionados. Nesta primeira tentativa, os processamentos resultaram em dez imagens regradadas, sendo que o resultado final não foi satisfatório.

Numa segunda tentativa, foram fornecidos os *end-members* na forma de espectros de referência obtidos com espectroscopia de reflectância, reamostrados para o sensor ASTER. Novamente os resultados não foram satisfatórios, mesmo variando o limiar angular espectral de 0.10 a 0.30.

Numa terceira e última tentativa, os *end-members* foram tomados na própria cena ASTER. As classes criadas foram: Calcário Calcítico (cc), Calcário Dolomítico (cd), Mata Seca (ms), Cerrado (cer), Cultivo (cul), Solo Exposto (se) e Água (ag) (Figura 3.17 A). Estas foram definidas a partir de análise visual, com base no conhecimento do intérprete ou em verdade de campo, sobre composição colorida 4R3G2B. Foram computadas as estatísticas de cada classe, sendo que seus valores médios foram convertidos em espectros de referência. Os resultados se mostraram condizentes com a análise visual.

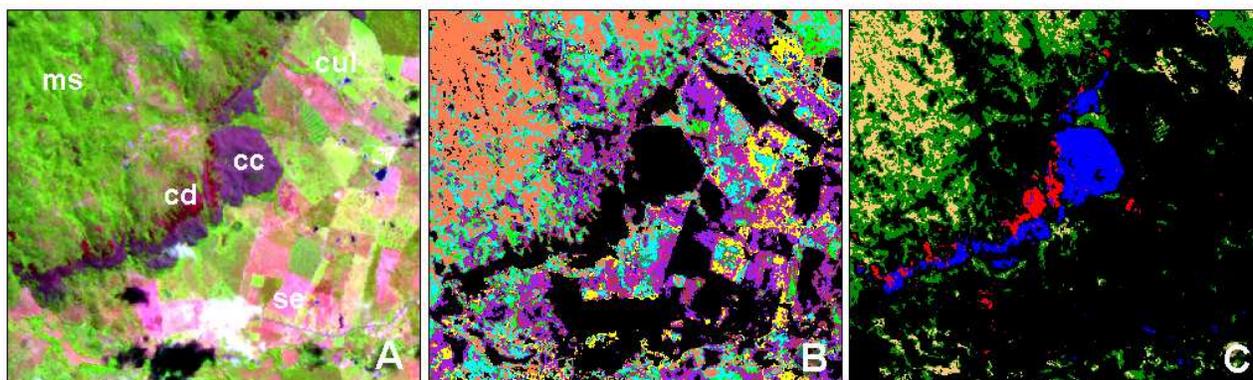
A técnica SAM não foi satisfatória na extração dos *end-members* com base na pureza do pixel, sendo que o número de classes criadas (10) foi superestimado. Materiais foram classificados indevidamente, ou mesmo não classificados, como no caso dos afloramentos carbonáticos e solos expostos. Regiões de “mata seca” foram classificadas erroneamente como “cerrado” (Figura 3.17 B).

Na tentativa que envolveu a inserção de *end-members* de rochas tomados em laboratório, tanto da face fresca, quanto da alterada, o resultado da classificação foi nulo. Foi verificada uma diferença significativa entre os espectros de laboratório e os espectros extraídos de pontos conhecidos na cena ASTER.

Os resultados verificados com a classificação a partir de espectros obtidos com pontos de treinamento (ROI) da própria imagem se mostraram satisfatórios, tendo sido feita a discriminação entre calcários calcíticos e calcários dolomíticos e a classificação de solos expostos e áreas de cultivo.

A discriminação entre as duas litofácies carbonáticas (calcários calcíticos e calcários dolomíticos) foi observada ainda no plano das composições coloridas. Esta discriminação foi possível devido à presença de matéria orgânica, responsável pela coloração cinza escura dos calcários calcíticos e, conseqüentemente, menor reflectância quando comparada aos calcários dolomíticos. Além disso, os calcários dolomíticos, situados no topo da formação carbonática, apresentam tons mais avermelhados devidos à presença de óxidos de Fe, provenientes da proximidade com a formação Urucuia, sotoposta à seqüência carbonática.

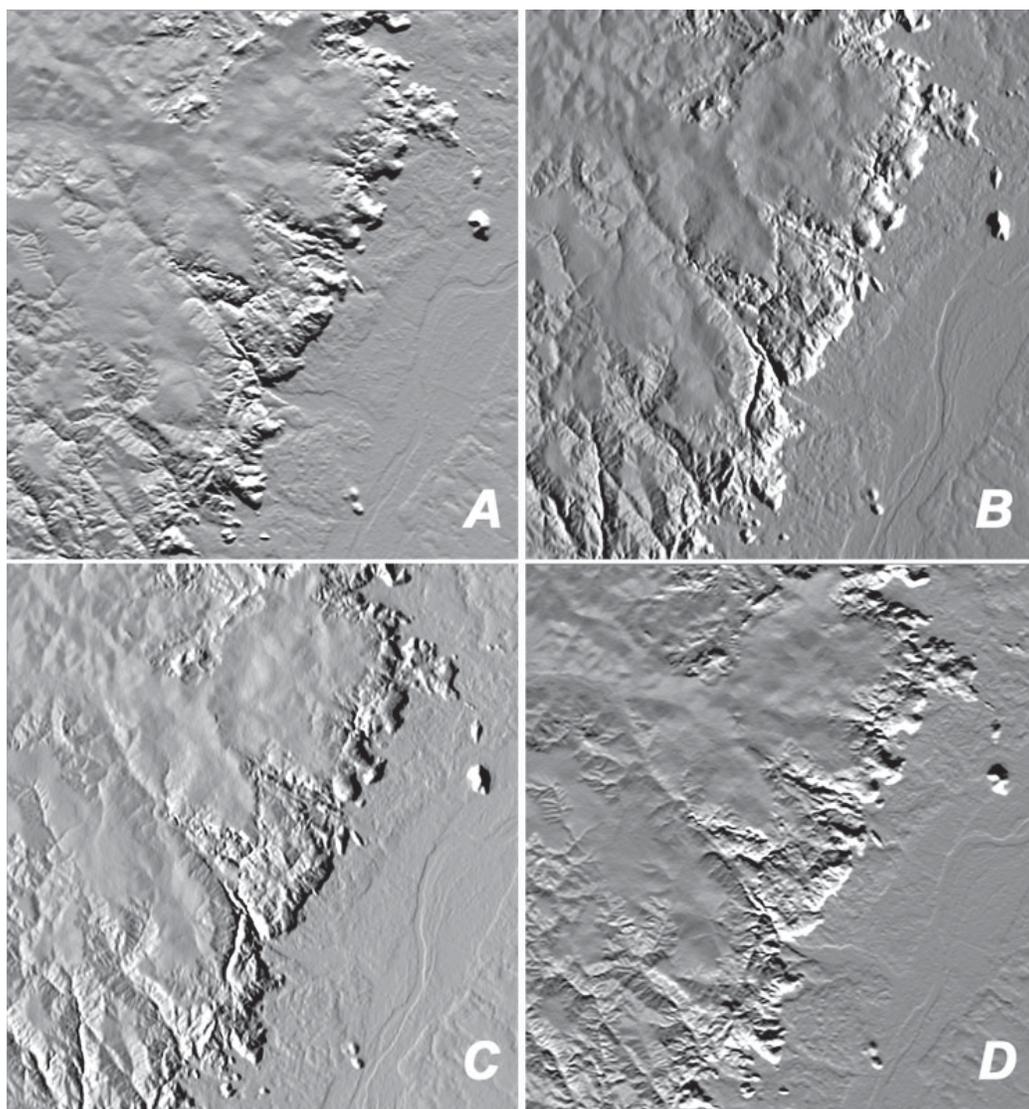
Por outro lado, a discriminação entre as fitofisiografias “cerrado” e “mata seca de calcário” não se mostrou efetiva, sendo que áreas significativas de “mata seca” foram classificadas como “cerrado” (Figura 3.17 C).



**Figura 3.17: Detalhe da Classificação SAM sobre cena ASTER, obtida com definição de *end-members* a partir do agrupamento estatístico de pixels puros (B) e por ROI's (C), tendo como referência composição colorida 4R3G2B (A). Nota-se que a região de solos expostos e cultivos foram omitidos em “C” para melhor visualização da discriminação entre calcários calcíticos (em azul) e calcários dolomíticos (em vermelho) e a discriminação inadequada ente mata seca e cerrado.**

### 3.7.5 – TRANSFORMAÇÕES ESPACIAIS

Foram realizadas filtragens direcionais por convolução sobre os dados SRTM, visando o realce de lineamentos positivos e negativos de relevo, perpendiculares aos azimutes de iluminação, de direções Norte, Leste, Sul e Oeste. Os lineamentos são feições superficiais mapeáveis, lineares ou curvilíneas, que podem estar associadas a falhas, fraturas ou outras estruturas geológicas (Sabins 1997) (Figuras 3.18 e 4.4), tendo sido extraídos de forma manual sobre os modelos SRTM iluminados.



**Figura 3.18: Filtragens Direcionais sobre dados SRTM, de direções Norte (A), Leste (B), Oeste (C) e Sul (D) utilizadas para a extração de lineamentos.**

### 3.8 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram analisadas várias composições coloridas para as cenas dos sensores ETM+ e ASTER, sendo que, para o primeiro, as que apresentaram melhores resultados à percepção visual foram a 4R5G7B, a 3R2G1B, a 5R4G3B e a 7R5G2B. Para a cena ASTER, as melhores composições no que se refere à percepção visual, foram a 4R3G2B, a 5R1G3B e a 3R2G4B.

O aumento linear de contraste com 2% de saturação se mostrou satisfatório, tanto para o sensor ETM+, quanto para o ASTER, sendo que o resultado obtido com a transformação HSI foi considerado superior no que se refere à percepção visual, mesmo pra tripletes com bandas pouco correlacionadas.

Os modelos digitais de elevação gerados a partir dos dados SRTM e ASTER serviram para a realização de análises espaciais, foco do capítulo subsequente. A resolução espacial relativamente baixa dos dados SRTM não impediu a geração de modelos de elevação consistentes, quando comparados às curvas de nível das cartas topográficas em escala 1.100.000.

Os índices de vegetação gerados (NDVI) contribuíram para a delimitação dos domínios carbonáticos, tendo sido utilizados como indicadores secundários destes. As áreas de maior reflectância estão relacionadas à presença de vegetação, sendo associadas à biomassa, porcentagem de cobertura do solo e atividade fotossintética.

No NDVI gerado a partir do ETM+ (21/09/2000), percebem-se os maiores valores de biomassa, foliar e/ou níveis de pigmentos em tons de vermelho a amarelo, em geral associados às fitofisiografias do Compartimento Planalto dos Gerais, coincidindo com os arenitos Urucua e crostas lateríticas (fitofisiografia cerrado). Os maiores índices são verificados também junto às margens do rio São Francisco (Compartimento da Depressão do São Francisco), na forma de matas ciliares e como culturas irrigadas por pivôs centrais. Os tons de verde (Figura 3.16) são verificados nos Compartimentos da Zona de Transição e Carstificado e representam a transição do cerrado para a mata seca de calcário, fitofisiografia associada à exposição de carbonatos. Os tons de azul representam os menores valores de biomassa, que incluem rochas expostas, solo desnudo e áreas agricultáveis (Figura 3.16).

No NDVI gerado a partir do ASTER (13/04/2001), os tons de vermelho (Figura 3.16) a amarelo estão associados aos maiores índices de biomassa e/ou foliares, os tons verdes a uma faixa intermediária e os tons de azul aos valores mais baixos. No entanto, os níveis maiores ultrapassam os limites dos compartimentos geomorfológicos, abrangendo inclusive as sombras de nuvens, não sendo possível fazer a associação direta com as fitofisiografias, ou seja, discriminar os cerrados da mata seca de calcário. Os níveis mais baixos, em tons de azul, vão do ciano ao preto e representam afloramentos desnudos, solos expostos, áreas agricultáveis, nuvens e corpos d'água, com bastante propriedade (Figura 3.14).

A espectroscopia de reflectância permitiu a análise qualitativa das amostras de rochas carbonáticas da área de estudo, obtida com a caracterização espectro-mineralógica, realizada de forma empírica e complementar à descrição macroscópica. Variações litofaciológicas foram descritas, tendo sido discriminados calcários calcíticos de calcários dolomíticos e assinaladas a presença de Fe, gipsita, argilominerais e flora. Os resultados obtidos com a ER contribuíram para o detalhamento da coluna estratigráfica com base em amostragens junto ao cânion do rio Peruaçu.

A presença de matéria orgânica nos calcários calcíticos e a presença de óxidos de Fe nos calcários dolomíticos, além de sua maior reflectância, foram os elementos que propiciaram a discriminação destas duas litofácies.

Entre 460 e 600 m de altitude verifica-se a ocorrência de calcário calcítico, cinza médio escuro, criptocristalino, maciço e compacto. Próximo aos 600 m observa-se calcário calcítico, cinza amarronzado, criptocristalino, sendo notável a presença de Fe. O mineral gipsita ocorre próximo à cota 620 m. Até por volta os 700 m de altitude observa-se um calcário calcítico, cinza amarronzado claro, microcristalino, e também a presença de Fe. A partir dos 700 m, observa-se o calcário dolomítico, de coloração rosa claro, microcristalino, onde verifica-se concentração de minerais ferruginosos oxidados, de coloração marrom-escuro. Aos 720 m, verifica-se uma litofácies dolomítica, de coloração cinza rosada, grosseiramente cristalina. Por volta dos 740 m, observa-se calcário dolomítico, cinza médio, criptocristalino, com deposições de material ferruginoso oxidado, de coloração marrom-avermelhada (Figura 3.11).

A presença de matéria orgânica, responsável pela coloração escura das amostras de calcário calcítico, ocasionou a redução na reflectância total do espectro, gerando um padrão bem distinto do observado nos calcários dolomíticos. Estes possuem uma maior reflectância, sendo em geral de tonalidades avermelhadas, devido muito provavelmente à maior proximidade com os arenitos da Formação Urucuia, de composição ferruginosa.

Foram observadas diferenças significativas entre espectros de rocha fresca e rocha alterada, ocasionadas pela presença de líquens, superfícies de alteração, deposição de argilo-minerais e Fe.

Feições de absorção diagnósticas permitiram a identificação de minerais como calcita, dolomita, gipsita, Fe e argilo-minerais, além das feições associadas à presença de líquens.

Os espectros de referência gerados nesta etapa do trabalho foram incluídos em uma biblioteca espectral, servindo de *end-members* para a etapa posterior, a classificação SAM.

A classificação espectral da cena ASTER foi conduzida com o assistente *Spectral Hourglass Wizard* e utilizando a técnica de classificação SAM, inicialmente através da extração automatizada dos *end-members*, introduzindo espectros de referência num segundo momento e extraíndo os espectros da própria imagem numa terceira abordagem. Somente nesta última os resultados se mostraram satisfatórios. A discrepância entre os espectros de laboratório e os tomados a partir de pixels da imagem é a causa provável dos resultados insatisfatórios obtidos nas duas primeiras abordagens de classificação (Figura 3.19).

Essa discrepância pode ser explicada pela combinação de vários fatores, tais como imprecisão na correção atmosférica da imagem ASTER, dimensões relativamente altas dos pixels (15x15m no VNIR e 30 x 30m no SWIR), o que resulta em misturas espectrais de vários materiais presentes no interior de cada pixel, além da ocorrência de significativo sombreamento topográfico e de cobertura parcial de nuvens sobre a área de estudos.

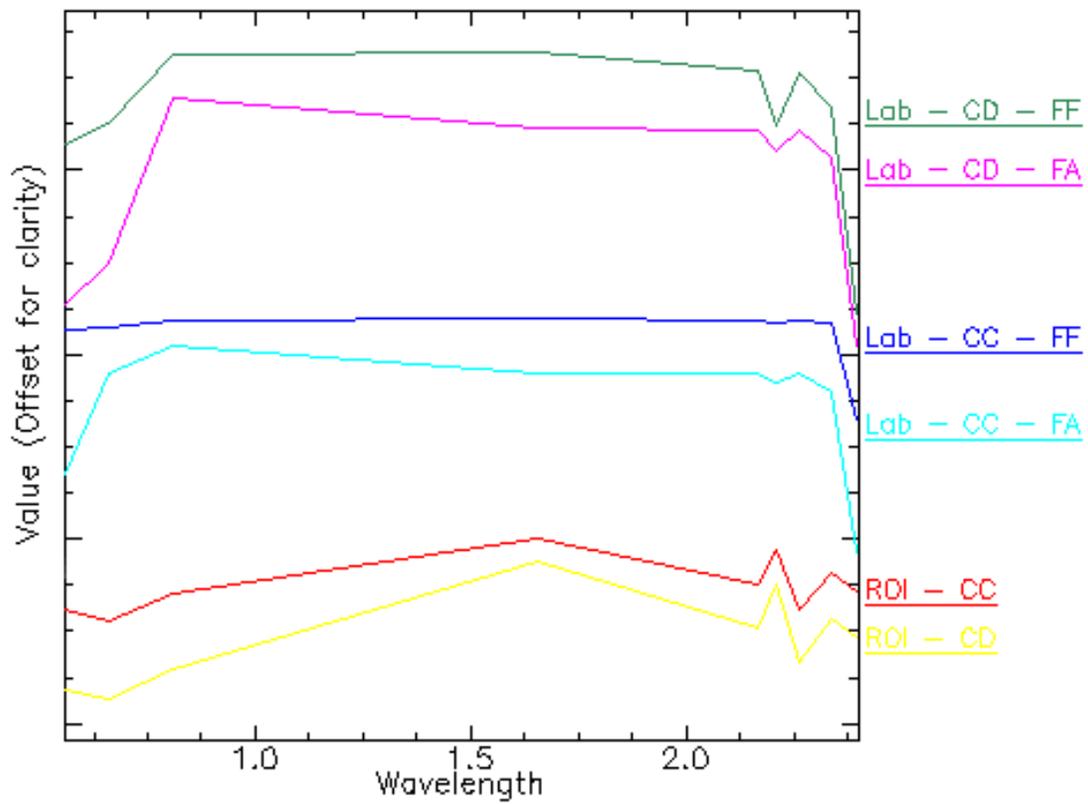


Figura 3.19: Comparação entre os espectros de calcário calcítico (CC) e calcário dolomítico (CD), face fresca (FF) e face alterada (FA), tomados em laboratório (Lab) e na imagem (ROI), reamostrados para o sensor ASTER.

## ***CAPÍTULO 4: SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS***

---

### **4.1 – INTRODUÇÃO**

Ainda que seja utilizado para manejo ambiental há décadas, o emprego de SIG para estudo e caracterização de áreas cársticas é relativamente recente e ainda restrito, seja por grupos espeleológicos, consultorias ambientais ou órgãos governamentais. Sistemas de Informações Geográficas provêm as ferramentas analíticas para ajudar a compreender a distribuição espacial de informações geográficas e modelar suas interações procurando, em muitos casos, padrões e relações previamente irreconhecíveis (Szukalski 2002).

A característica principal do SIG é sua capacidade de transformar, analisar e integrar dados espaciais, estes entendidos como a descrição quantitativa e ou qualitativa de fenômenos que ocorrem no mundo real (Silva 2003). Através das distribuições espaciais, análises morfométricas e o estabelecimento de relações entre os planos de informação, é possível diminuir a subjetividade na caracterização física do espaço geográfico.

Os objetivos a serem alcançados com o uso de SIG nesta pesquisa se referem à integração de dados provenientes de diferentes fontes e em formatos distintos, propiciando análises espaciais, estatísticas e geração de cartas, dando suporte à decisão no que tange aos procedimentos definidos no Plano de Manejo do PNCP. Estes dados foram coletados em épocas históricas diferentes, com objetivos variados, nas mais diversas resoluções e gerados por diferentes autores.

### **4.2 - FONTES E FORMATOS DOS DADOS**

#### **4.2.1 – ARQUIVOS VETORIAIS**

Os arquivos vetoriais empregados na pesquisa são de fontes diversas e abrangem escalas de representação que variam entre 1:10.000 e 1:1.000.000, consistindo de mapas temáticos e dados cadastrais, em formato proprietário *shapefile*, sistema de projeção Universal Transversa de Mercator e *datum* SAD 69.

Neste conjunto de dados estão reunidos mapas temáticos regionais (geologia, geomorfologia, malha viária, divisão administrativa, sede municipal, hidrografia, malha viária) (ANEEL 2002),

geologia e recursos minerais (CPRM 2001), além de mapas temáticos locais (geologia, geomorfologia, hidrologia, espeleologia, pedologia, zoneamento e limites das UCs, fitofisiografias, limites da Reserva Xacriabá, divisão e sede administrativa, malha viária, vegetação e uso e ocupação do solo), provenientes do Plano de Manejo do PNCP e cedidos pelo IBAMA.

Os dados cadastrais referem-se às ocorrência de cavernas e sítios arqueológicos em abrigos-sob-rocha, sendo que 66 estão localizados no município de Itacarambi, 95 em Januária, seis na divisa destes dois municípios e 14 em São João das Missões. Estes registros estão contidos em uma base de dados do Microsoft Access e apresentam informações sobre a identificação (nome da ocorrência, código de cadastramento, sinonímia), localização (coordenadas, altitude, localidade), referências ao grupo ou pessoa que cadastrou ou que tenha realizado estudos, existência de topografia e grau de precisão e as características da ocorrência (litologia, hidrografia, padrão de desenvolvimento, potencial científico ou turístico e estado de conservação, proximidade a minerações, posicionamento topográfico, desenvolvimentos horizontal e linear e desnível). Distribuem-se pelo interior e entorno do PNCP e são provenientes dos arquivos da SEE, do Cadastro Nacional de Cavidades – CNC, do Plano de Manejo do PNCP e revistas especializadas.

Foram incluídos os contornos de vinte e duas plantas baixas de cavernas (Gruta do Índio, Gruta das Velas, Gruta Ralo D'Água, Abrigo das Cobras, Gruta do Suspiro, Lapa do Rezar, Gruta Brejal, Gruta Caboclo, Gruta do Desprezo, Gruta Bonita, Arco do André, Gruta dos Ossos, Gruta dos Desenhos, Gruta Olhos D'Água, Gruta Troncos, Gruta Cascudos, Gruta da Hora, Gruta do Janelão, Toca da Onça, Gruta Capim Vermelho, Gruta do Carlúcio e Gruta do Santo). Os mapas topográficos das cavidades foram obtidos junto à SEE, ao GBPE, ao IBAMA e em publicações como a Revista Espeleologia, Revista O Carste e o Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu.

Foram inseridos também os dados provenientes dos trabalhos de campo, como pontos descritos, pontos de controle (GPC's) e caminhamentos, levantados com GPS Garmin Etrex, com precisão em torno de 20 m informada pelo receptor.

#### 4.2.2 – ARQUIVOS MATRICIAIS

O conjunto de arquivos matriciais, ou *raster*, é derivado do processamento digital de imagens multiespectrais dos sensores ASTER e ETM+, dados SRTM, ortofotos e cartas topográficas, agrupados em mapas observacionais e analíticos.

Os mapas observacionais se referem às imagens dos sensores ETM+ (órbita 219, ponto 70, adquirida em 21 de setembro de 2000)<sup>1</sup> e ASTER (AST\_L1B\_003\_04172001132948\_01302004115038, adquirida em 17 de abril de 2001), mapa geológico, geomorfológico, fitofisiográfico, uso e ocupação do solo, ortofotos (217803, 217805, 217813, 217814, 217815, 217824, 217825, 217835)<sup>2</sup> e cartas topográficas em escala de 1:100.000, folhas Januária (SD.23-Z-C-II) e Japoré (SD.23-Z-A-V).

Os mapas analíticos compreendem produtos derivados de processamento digital de imagens multiespectrais, como composições coloridas, classificações supervisionadas, índice de vegetação, transformação IHS, além de modelos digitais de elevação, mapas de declividade e aspecto, derivados dos dados SRTM<sup>3</sup> e ortofotos.

### 4.3 – CARTOGRAFIA DIGITAL

As operações executadas relativas à cartografia digital constituem, em essência, uma etapa de pré-processamento, quando são realizadas adequações de formatos de arquivos, correções de topologias, verificações e refinamentos de mapas preexistentes (geologia e geomorfologia), vetorizações de elementos geográficos e geo-referenciamento de imagens raster.

As adequações de formatos de arquivos visaram à conversão dos arquivos vetoriais para o formato *shapefile*, assim como a transformação de arquivos raster e vetoriais para o sistema de projeção UTM, *datum* SAD 69.

Foram verificadas as relações topológicas de arquivos vetoriais, como disjunção, adjacência, contingência e interseção, sendo realizadas correções de erros qualitativos como excesso ou falta, giros, curvas estreitas e hesitantes.

<sup>1</sup> Disponível em <ftp://ftp.glcg.umiacs.umd.edu/glcg/Landsat/WRS2/>

<sup>2</sup> Disponibilizadas pela RURALMINAS e procedentes dos acervos da SEE e GBPE

<sup>3</sup> Disponível em <ftp://ftp.glcg.umiacs.umd.edu/glcg/SRTM/WRS2/>

Foi realizado o geo-referenciamento e o registro das imagens raster como mapas temáticos e mapas topográficos de cavernas, observando-se a declinação magnética destes.

Com base na interpretação das imagens de SR e mapas temáticos, foi feita a vetorização de elementos geográficos, como curvas de nível, quebras de relevo, drenagens, toponímia e malha viária.

#### **4.4 – MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (MDE)**

Modelo digital de elevação é uma representação matemática da distribuição espacial das variações altimétricas vinculadas a uma superfície real, em geral, contínua. O processo para a geração do MDE consiste nas etapas de aquisição e edição dos dados, geração e interpretação do modelo (Burrough 1998 *apud* Muller 2005).

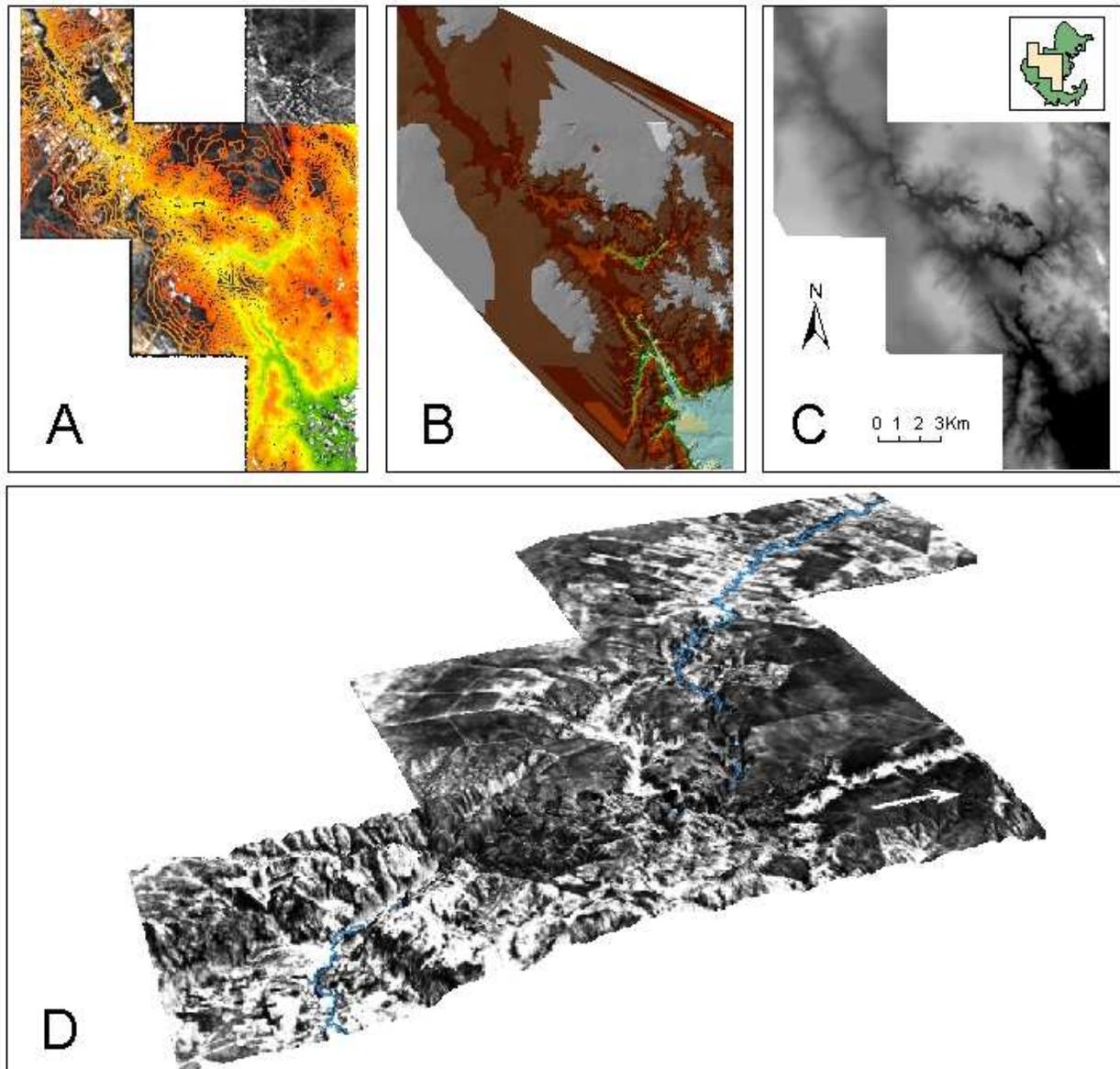
Este tipo de modelo matemático é de grande utilidade, pois fornece uma base objetiva para a identificação de sistemas terrestres por meio da aplicação de métodos paramétricos, como as análises morfométricas (Valeriano 2005). As variáveis do relevo mais utilizadas são a amplitude, a declividade, curvaturas vertical e horizontal e orientação de vertentes (aspecto).

A inserção dos modelos digitais de elevação no ambiente SIG teve como objetivo dar suporte às interpretações de características do meio físico, notadamente geomorfológicas e hidrológicas. Isto foi possível em função da aplicação de uma série de técnicas de processamento, como a extração de curvas de nível, extração de drenagens e delimitação de sub-bacias, geração de perfis topográficos, sombreamento sintético, extração de lineamentos, geração de mapa de declividade e fatiamento do relevo.

As operações executadas permitiram uma melhor visualização das características regionais, possibilitando o refinamento de mapas pré-existentes, análises morfométricas, geração de modelos 3D realísticos em perspectiva isométrica e animações de sobrevôos.

Foram elaborados MDE's a partir das ortofotos em escala 1:10.000, da imagem ASTER (resolução de 15 m) e com dados SRTM (resolução espacial de 90 m), cobrindo várias escalas de representação.

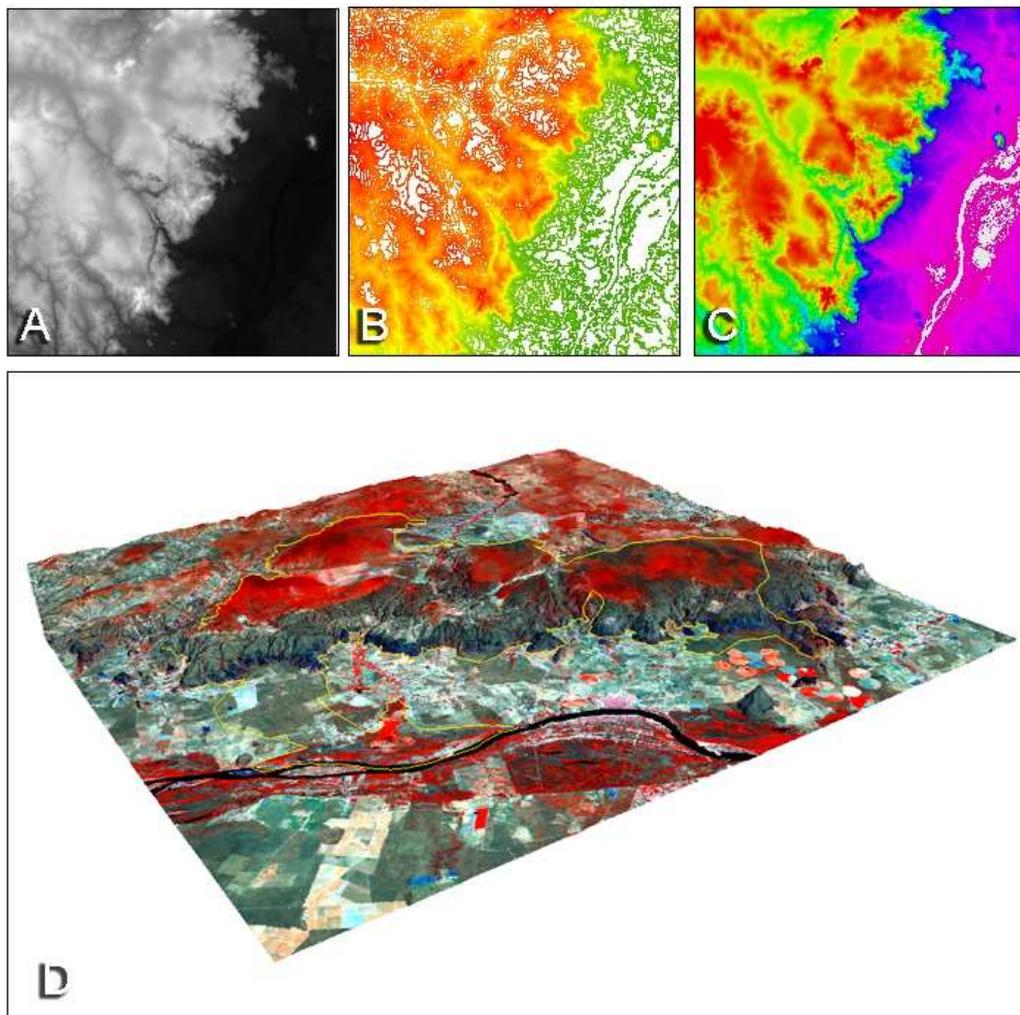
A geração do MDE do mosaico de ortofotos se iniciou com a geração de uma rede irregular de triângulos (TIN) utilizando-se a extensão 3D Analyst do *software* ArcGIS 9.1, que processou o arquivo de curvas de nível com equidistância de 10 m, previamente vetorizado no *software* AutoCAD Map3, com as cotas variando de 470 a 820 m. Após a geração do TIN, este foi convertido para o formato raster, em escala de cinza, utilizado como referência altimétrica (Figura 4.1).



**Figura 4.1: Processo de geração do MDE do cânion principal do rio Peruaçu (em azul) a partir do mosaico de ortofotos, com exagero vertical de 3x e resolução espacial de 1.3 m. Vetorização das curvas de nível (A), geração do TIN (B), conversão do TIN para raster (C) e o modelo final em perspectiva isométrica (D)**

Foi gerado um MDE a partir do par estereoscópico das bandas 3N (*Nadir*) e 3B (*Off-Nadir*) da cena ASTER com resolução espacial de 15 m, utilizando-se o *software* ASTER DTM, que funciona como *plug-in* do ENVI 4.2. No entanto, o resultado não foi considerado satisfatório, tanto pelo terraceamento observado, quanto por valores espúrios ocasionado pela cobertura de nuvens e pela lâmina d'água do rio São Francisco. As cotas variaram de 250 a 946 m de altitude.

Por fim, foi gerado um MDE dos dados SRTM no *software* ENVI 4.2 a partir dos arquivos HGT, tendo sido eliminados os efeitos de valores espúrios, como *spikes* e *wells*. Foi feita a extração automática das curvas de nível com equidistância de 10 m, entre as cotas 440 e 840 m além do sombreamento sintético (Figura 4.2).



**Figura 4.2:** Processo de geração do MDE da área de estudo a partir dos dados SRTM com resolução espacial de 90 m. Geração de imagem em tons de cinza com os valores altimétricos (A), extração automática das curvas de nível (B), sombreamento sintético com a paleta Rainbow (C) e sobreposição de composição colorida Landsat 4R5G7B em perspectiva isométrica com exagero vertical de 5x (D).

## 4.5– ANÁLISES ESPACIAIS E ESTATÍSTICAS

### 4.5.1 - GEOLOGIA

Os cálculos das áreas das seis classes litológicas observadas na região (Figura 2.1) e da situação do carste foram realizados com o *software* ArcGIS 9.1 e *plug-in* XTools<sup>4</sup>, a partir do mapa geológico refinado.

Em relação às litologias, temos os seguintes resultados: Aluvião – 142,69 Km<sup>2</sup> (7.2%); Arenitos – 540,88 Km<sup>2</sup> (27.4%); Argilitos – 25,51 Km<sup>2</sup> (1.3%); Coberturas Detríticas – 584,93 Km<sup>2</sup> (29.6%); Granitóides – 0,36 Km<sup>2</sup> (0.02%) e Seqüência Carbonática – 683,15 Km<sup>2</sup> (34.5%) (Gráfico 4.1 A).

Considerando que a quase totalidade da área encontra-se inserida em domínios cársticos<sup>5</sup>, temos a seguinte distribuição em relação à sua situação: carste subjacente (onde ocorre a seqüência carbonática sob outras litologias, como arenitos e argilitos) perfazendo 28.6% da área (566,38 Km<sup>2</sup>); carste desnudo (onde ocorre a exposição da seqüência carbonática), com 34.5% (683,15 Km<sup>2</sup>); carste encoberto (onde ocorre a deposição de coberturas detríticas e aluviões sobre a seqüência carbonática), com 36.8% (727,62 Km<sup>2</sup>) e a área não-cárstica, com 0.02% da área total (0,36 Km<sup>2</sup>) (Gráfico 4.1 B).



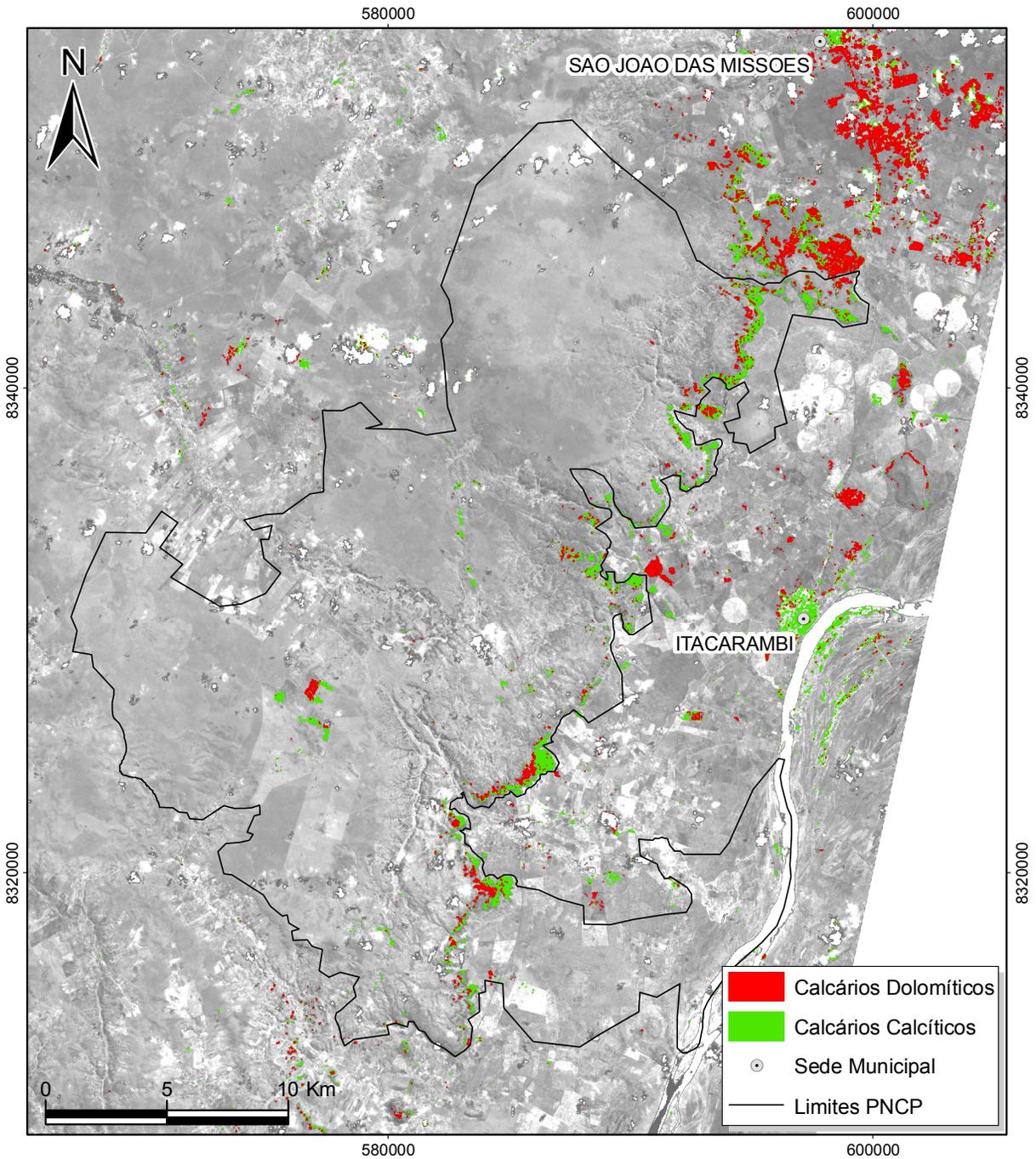
Gráfico 4. 1: Porcentagens das litologias da área de estudo (A) e situação do carste (B)

A exposição dos calcários calcíticos representa 0.553% (11.96 Km<sup>2</sup>) enquanto que os calcários dolomíticos representam 0.436% (9.43 Km<sup>2</sup>) da área total. Estes valores foram calculados a partir da classificação espectral SAM da cena ASTER. No entanto, vale ressaltar que tais valores são

<sup>4</sup> Disponível em [www.esri.com](http://www.esri.com)

<sup>5</sup> À exceção da restrita área de ocorrência de granitóides

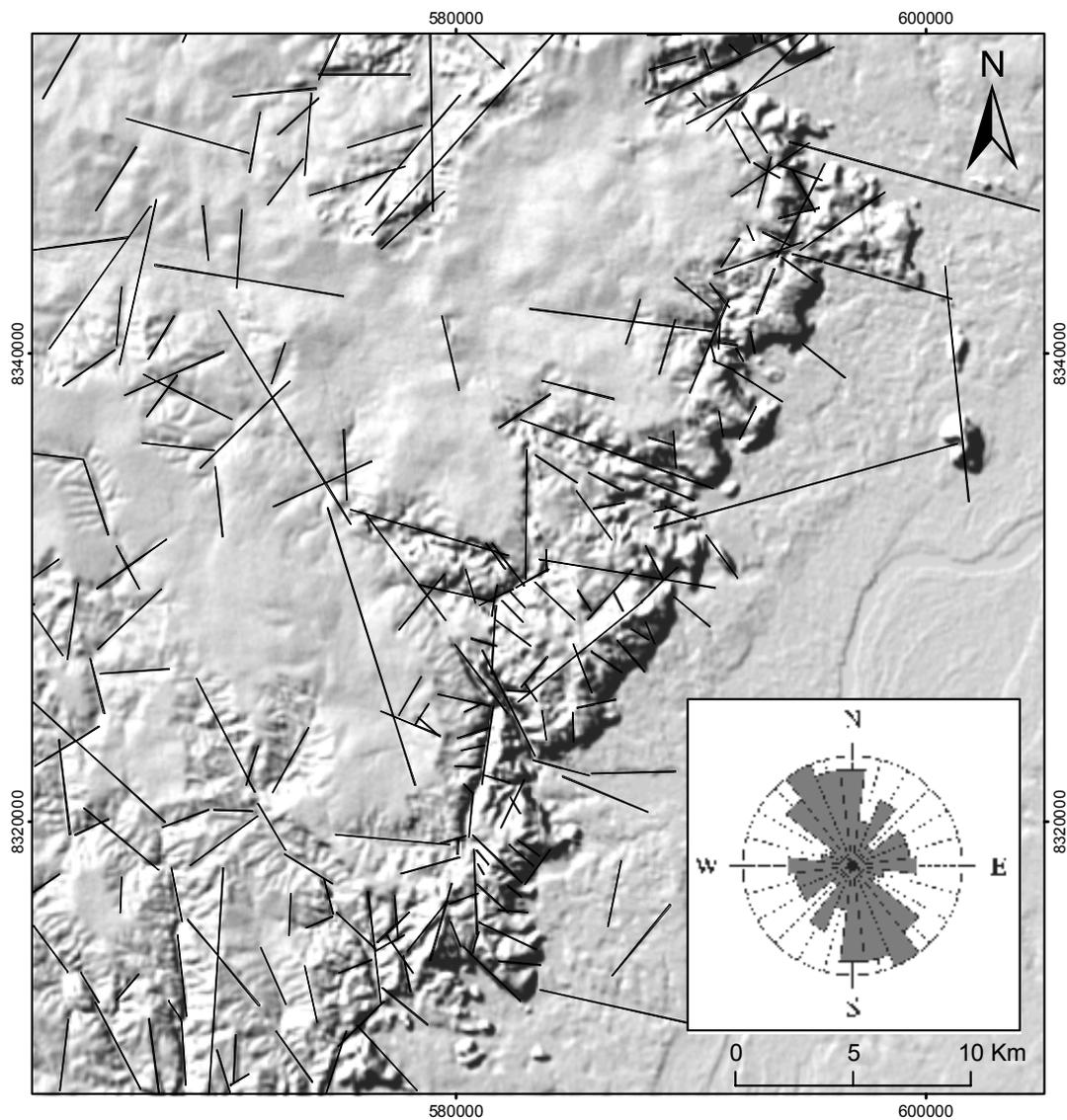
superestimados, uma vez que a classificação espectral SAM mapeou equivocadamente solos com teor de Fe (extremo NE da área) como se fossem calcários dolomíticos. Além disso, parte dos perímetros urbanos das cidades de Itacarambi e São João das Missões foi classificada como calcário calcítico, em função da utilização desta rocha para a pavimentação das ruas (Figura 4.3).



**Figura 4.3: Mapa de distribuição de calcários calcíticos e calcários dolomíticos classificados com a técnica SAM a partir da imagem ASTER (banda 3 como imagem de fundo)**

Foram extraídos lineamentos a partir dos modelos digitais de elevação – MDE do SRTM e da cena do sensor Landsat/ETM+. Para o realce destes lineamentos foram utilizados filtros direcionais de sentido N, S, E e W sobre o MDE do SRTM.

Lineamentos podem ser entendidos como feições superficiais mapeáveis, lineares ou curvilíneas, que podem estar associadas a falhas, fraturas ou outras estruturas (Sabins 1997). Esses lineamentos são o resultado superficial dos condicionantes estruturais que contribuem para as tendências da evolução do modelado cárstico, o que incluem as cavidades naturais subterrâneas.



**Figura 4.4: Diagrama de roseta dos lineamentos extraídos sobre modelo digital de elevação dos dados SRTM e imagem Landsat 7/ETM+**

Os critérios adotados para a identificação dos lineamentos são os alinhamentos de escarpas e vales, traçados retilíneos de drenagens superficiais e padrões de vegetação orientadas segundo direções preferenciais.

A extração dos lineamentos foi realizada a partir de análise visual no *software* ArcGIS 9.1, num total de 484 traços, predominantemente negativos, sendo que seus comprimentos e direções foram calculados através do *plugin* ArcSDM<sup>6</sup>. O arquivo resultante foi inserido no *software* ERMapper 6.4, onde foram gerados os diagramas de roseta através do *wizard* “*Lineaments*”, com agrupamentos em intervalos de 15°.

O digrama de roseta foi utilizado para representar as variações na orientação dos lineamentos agrupadas em classes, de acordo com a frequência de ocorrência em determinadas direções (Carvalho *et al* 2005). Os resultados podem ser observados na Figura 4.4, onde se destacam as direções preferenciais, ou *trends*, NW-SE, N-S, NE-SW e E-W.

#### 4.5.2 - GEOMORFOLOGIA

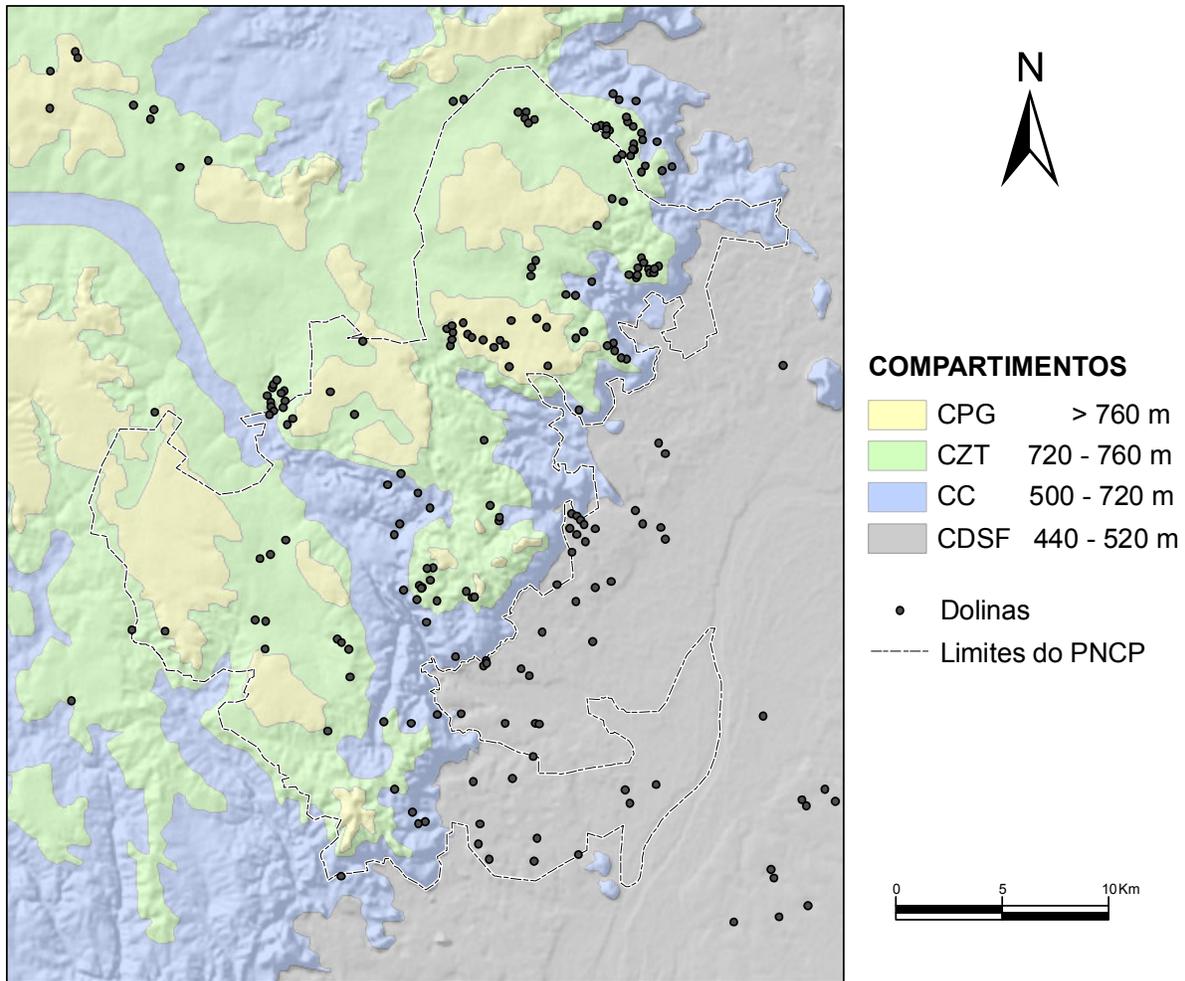
A definição de unidades geomorfológicas a partir de dados morfométricos visa reduzir a subjetividade nos procedimentos de análise, possibilitando a realização de análise qualitativa e quantitativa a partir de modelos (Leal 2003). Ferrari (1998) considera que a aplicação de parâmetros morfométricos pode gerar uma assinatura quantitativa da totalidade da paisagem cárstica, favorecendo a comparação de paisagens com contextos climáticos ou geológicos diferenciados.

Os procedimentos voltados à caracterização quantitativa através de indicadores morfométricos se iniciaram com o fatiamento do relevo no *software* ENVI 4.1 a partir do MDE sobre dados SRTM, tendo por finalidade, servir de referência para o refinamento do mapa geomorfológico pré-existente.

A compartimentação geomorfológica do PNCP foi inicialmente definida por Piló (1989) e reformulada durante os trabalhos do Plano de Manejo do PNCP (IBAMA 2005b), estando dividida em quatro classes: Compartimento Planalto dos Gerais: cotas maiores que 760 m; Compartimento Zona de Transição: 720 a 760 m; Compartimento Carstificado: 500 a 720 m; Compartimento da Depressão do São Francisco: 440 a 500m (Figura 4.5). A pertinência desta distribuição pôde ser demonstrada pela análise do histograma de frequência dos dados altimétricos, que apresentou comportamento bimodal (Figura 4.6).

---

<sup>6</sup> ArcSDM – Spatial Data Modeller, disponível em <http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/ARCSDM3/>



Fonte: IBAMA 2005 (modif.), ANEEL 2001, NASA 2001

Figura 4.5: Mapa da compartimentação geomorfológica e distribuição das dolinas

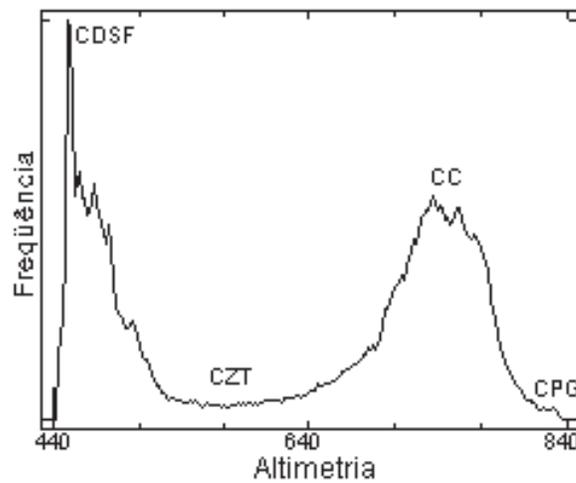
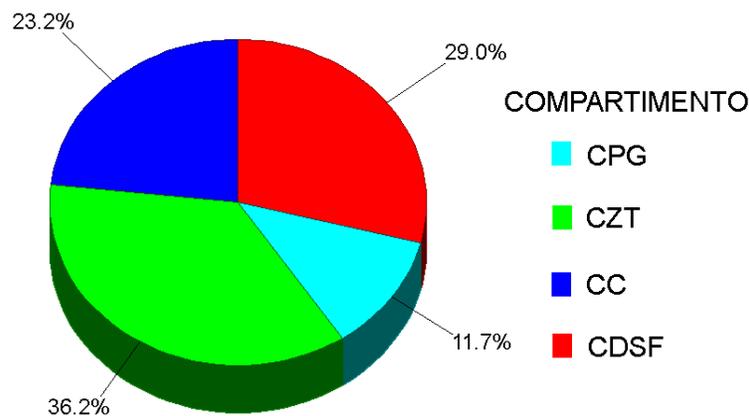


Figura 4.6: Histograma de distribuição da frequência dos dados altimétricos a partir de MDE gerado com dados SRTM, apresentando comportamento bimodal.

O refinamento do mapa geomorfológico foi feito através de análise visual, tomando como referência o mapa de fatiamento do relevo e a composição colorida 4R5G7B do ETM+, resultando em diferenças sensíveis no que se refere à área das classes, principalmente nos compartimentos Planalto dos Gerais, Zona de Transição e Carstificado.

Seguiu-se com o cálculo da área e porcentagem dos compartimentos geomorfológicos a partir do *plug-in* XTools e extensão Arctoolbox do *software* ArcGIS 9.1, tendo apresentado os seguintes resultados: Compartimento Planalto dos Gerais - 232,71 Km<sup>2</sup> (11.7%); Compartimento da Zona de Transição - 576,86 Km<sup>2</sup> (36.2%); Compartimento Carstificado - 461.73 Km<sup>2</sup> (23.2%) e Compartimento da Depressão do São Francisco - 719,99 Km<sup>2</sup> (29.0%) (Gráfico 4.2).



**Gráfico 4.2: Porcentagens das áreas dos compartimentos geomorfológicos: Compartimento Planalto dos Gerais - CPG, Compartimento da Zona de Transição – CZT, Compartimento Carstificado – CC e Compartimento da Depressão do São Francisco.**

O índice de rugosidade pode ser utilizado como parâmetro para a discriminação de estilos de carstes tropicais (Day 1979 *apud* Ferrari *et al* 1998), sendo obtido pela razão entre a área da superfície pela área planar.

O cálculo do índice de rugosidade contou com o auxílio da extensão 3D Analyst do *software* ArcGIS 9.1, apresentando os seguintes resultados para uma superfície TIN (*Triangular Irregular Networks*) gerada com os dados SRTM com resolução espacial de 90 m: Área 2D: 1966,938 Km<sup>2</sup>; Área 3D: 1975,438 Km<sup>2</sup>; Volume: 373,754 Km<sup>3</sup>; Índice de Rugosidade: 1,0043<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Este índice é dependente da escala, tendo apresentado valores diferentes quando comparado à mesma superfície gerada com outra resolução espacial.

A amplitude do relevo para a área de estudo é de 400 m, resultado da diferença da cota mais alta (840 m), pela cota mais baixa (440 m).

A declividade é um parâmetro morfométrico que pode ser utilizado para evidenciar os processos de dissolução cárstica, erosão e pedogênese, tendo sido definidas 5 classes de declive para diferenciar as toposseqüências: relevo plano (0-3%), suave ondulado (3-8%), ondulado (8-20%), forte ondulado (20-45%) e escarpado (>45%) (Arcoverde 2005). Percebe-se nitidamente a prevalência do relevo plano e suave ondulado, sendo que as maiores declividades estão associadas, principalmente, ao escarpamento do *front de cuesta*, de orientação NE-SW, aos cânions e a maciços isolados, como o morro de Itacarambi (Figura 4.7).

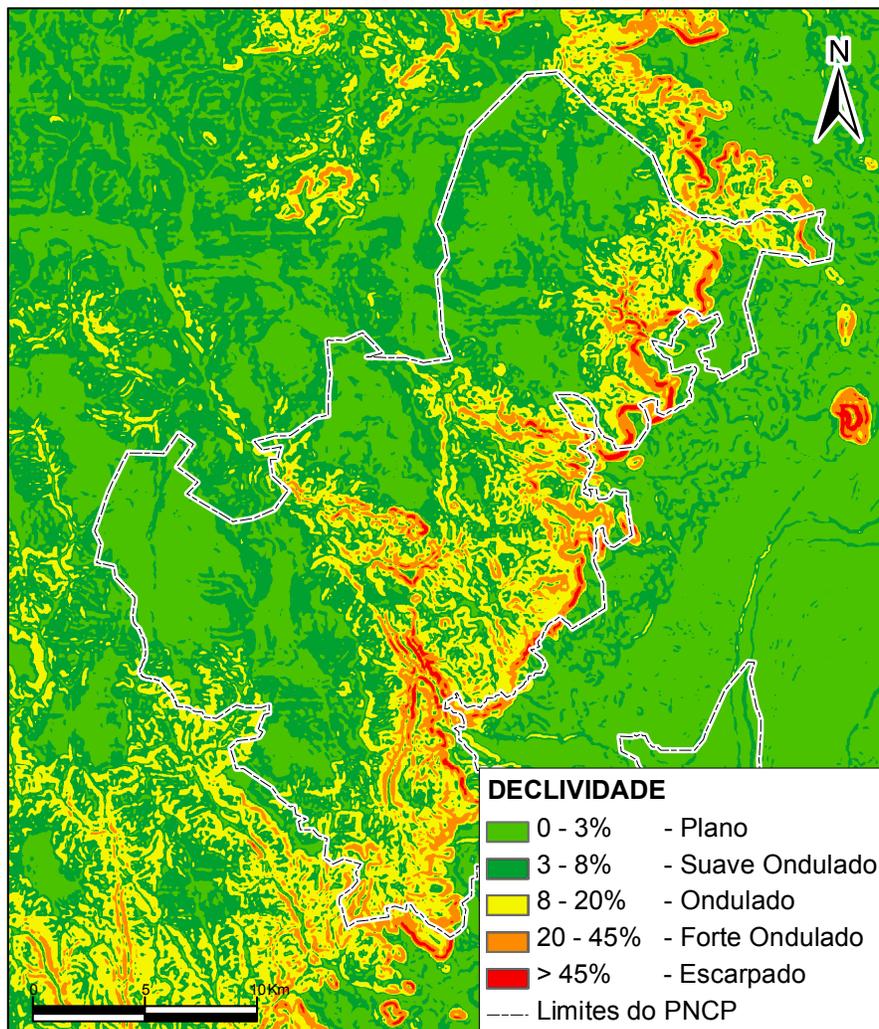
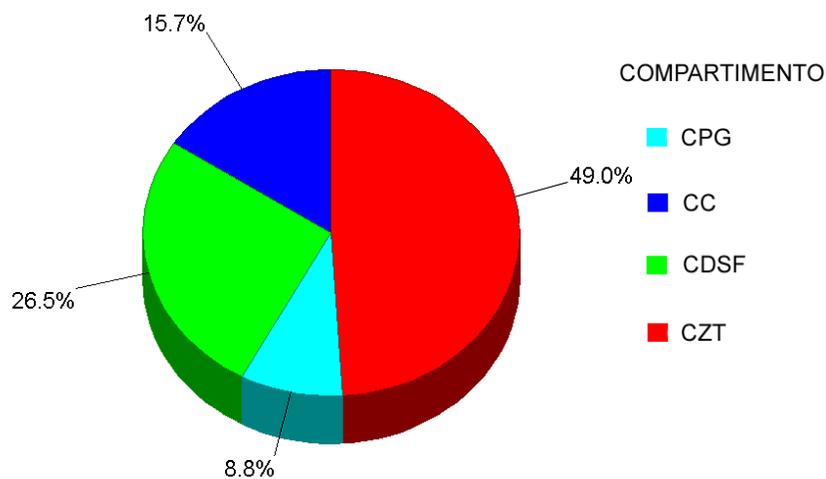


Figura 4.7: Mapa de declividade diferenciando as toposseqüências a partir de 5 classes

Foram identificadas duzentas e quatro dolinas de subsidência e colapso através de análise visual a partir de composições coloridas das imagens multiespectrais e da banda pancromática do ETM+, estando estas distribuídas irregularmente por todos os compartimentos geomorfológicos. A cobertura de nuvens na cena ASTER impediu sua utilização para este fim.

Estas dolinas se concentram principalmente no Compartimento da Zona de Transição, com 49.0% das ocorrências, seguido do Compartimento da Depressão do São Francisco (26.5%), Compartimento Carstificado (15.7%) e do Compartimento Planalto dos Gerais (8.8%) (Gráfico 4.3). Considerando-se o número total de dolinas em cada compartimento, dividido pela sua área, temos o seguinte resultado: para o CPG: 0,077 dolina / Km<sup>2</sup>; CZT: 0,173 dolina / Km<sup>2</sup>; CC: 0,069 dolina / Km<sup>2</sup> e CDSF: 0,075 dolina / Km<sup>2</sup>.

A ocorrência de dolinas de subsidência no contexto de rochas carbonáticas é a evidência superficial da ocorrência dessa litologia em subsuperfície, consistindo em um indicador indireto da direção de fraturas e zonas de fraqueza, ou seja, do sistema de drenagens subterrâneas (Oliveira 2001) e de processos de evolução do relevo.



**Gráfico 4.3: Porcentagem de distribuição das dolinas sobre a compartimentação geomorfológica**

#### 4.5.3 – HIDROGRAFIA

Uma rede de drenagens pode ser entendida como resultado da interação de fatores associados ao relevo, geologia, clima, vegetação, textura e permeabilidade do solo, sendo que seu padrão é definido pelo arranjo espacial dos rios e seus afluentes. A extração de informações para a sua caracterização se baseia em características qualitativas (forma ou tipo) e quantitativas (ordem de ramificação, distribuição, densidade e frequência) (Valeriano 2001).

A partir desta abordagem, foram definidos os parâmetros quantitativos que contribuem para a definição do padrão de uma rede de drenagem superficial: densidade de drenagem: razão entre o comprimento total dos canais pela área da bacia; frequência de drenagem: dada pela razão entre o número de rios e a área da bacia hidrográfica; textura topográfica: dada pela razão entre o número de canais pelo perímetro da bacia; comprimento médio dos canais: dado pela razão entre o comprimento total dos canais e o número de canais da bacia (Oliveira 2001); área e perímetro da bacia do rio Peruaçu; desnível total e comprimento total do rio Peruaçu.

As etapas relativas aos trabalhos de caracterização da hidrografia da área de estudo podem ser assim divididas: 1 – extração automática da rede de drenagens e delimitação da bacia do rio Peruaçu a partir de um MDE previamente gerado; 2 – análise dos resultados e execução de ajustes; 3 – extração dos parâmetros quantitativos; 4 - análise de parâmetros qualitativos.

A extração dos parâmetros quantitativos foi realizada somente para a bacia do rio Peruaçu, uma vez que esta é a única drenagem perene na região do PNCP. Já os parâmetros qualitativos se referem a toda a área de pesquisa.

Os procedimentos de extração automática das drenagens e delimitação das bacias foram realizados no *software* ArcGIS 9.1, através da extensão Arctoolbox sobre o MDE baseado nos dados SRTM, com resolução espacial de 90 m.

Num primeiro momento, foi utilizado o comando *Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill*, com o objetivo de se produzir um MDE sem as depressões. Na seqüência, foi determinada a direção de fluxo através do comando *Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction*, seguindo-se com a geração do fluxo acumulado (*Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation*).

A partir da imagem raster de fluxo acumulado, foi realizada extração das drenagens, utilizando-se o comando *Spatial Analyst Tools > Conditional > Con*, tendo sido testados vários limiares (50, 100, 200 e 500), sendo que o valor de 100 foi o que apresentou o melhor resultado do ponto de vista da análise visual.

A delimitação das bacias foi realizada inicialmente através da função *Spatial Analyst Tools >*

*Conditional* > *Con*, com limiares de 1000, 5000 e 10.000, sendo que este último valor foi o que cobriu toda a bacia do vale do rio Peruaçu. O segundo passo foi criar uma imagem raster com cada trecho de drenagem correspondente à direção de fluxo através da função *Spatial Analyst Tools* > *Hydrology* > *Streamlink*. Por fim, foi feita a delimitação da bacia através da função *Spatial Analyst Tools* > *Hydrology* > *Watershed*, tendo a imagem raster sido convertida para vetor.

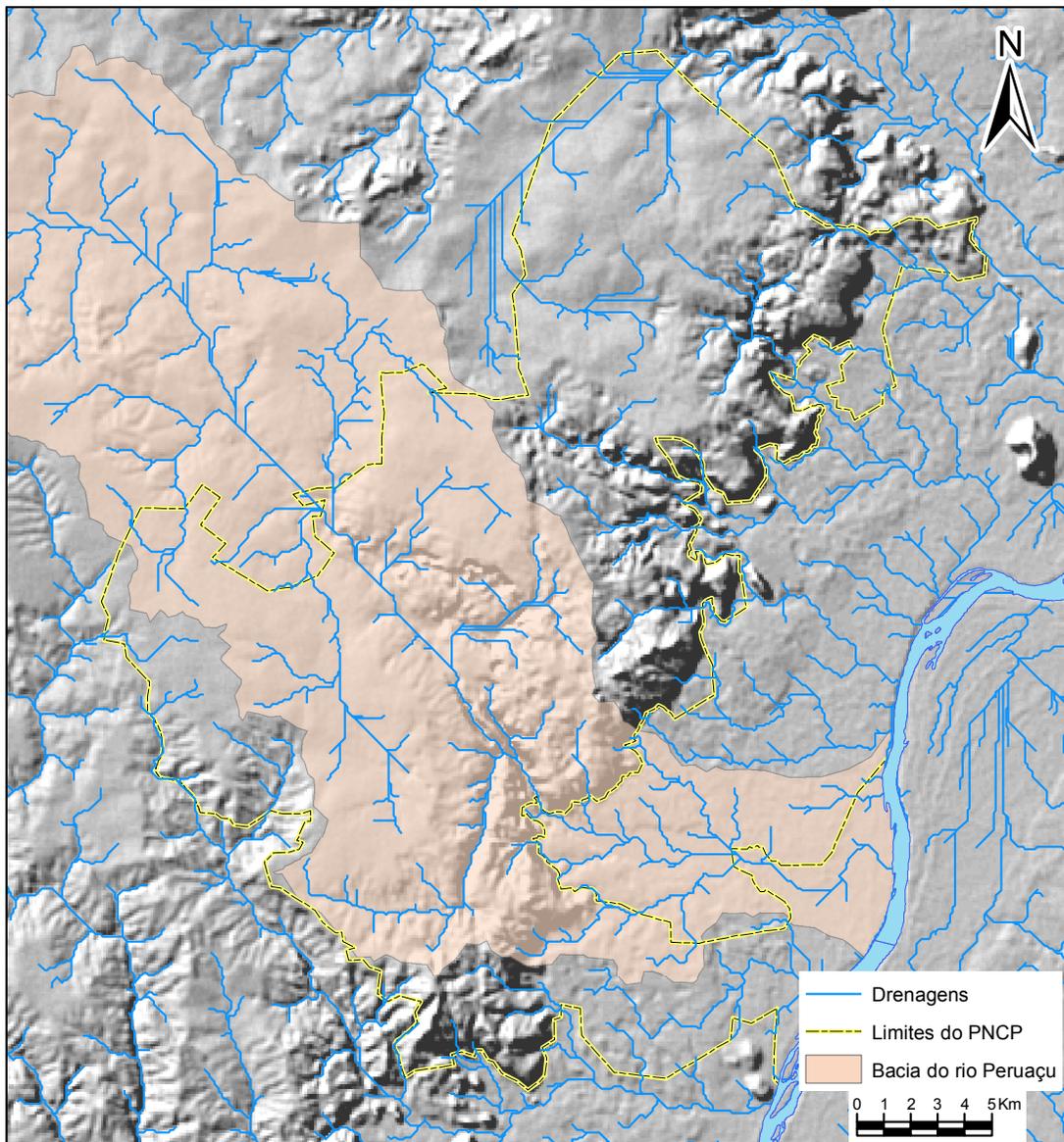
Foram realizados pequenos ajustes nos limites do polígono da bacia na região da foz do rio Peruaçu a partir de análise visual. Estes ajustes se fizeram necessários em função das limitações do modelo, causada pela relativa baixa resolução dos dados SRTM.

O cálculo de parâmetros quantitativos fornece informações sobre permeabilidade, porosidade, topografia, grau de dissolução das rochas, erodibilidade e condições climáticas, além do caimento do terrenos e/ou estruturas planares (Lima 1995). Foram calculados alguns parâmetros com o *plug-in* XTools do *software* ArcGIS 9.1, tendo apresentado os seguintes resultados: 1 - Área da bacia do rio Peruaçu: 523,11 Km<sup>2</sup>; Perímetro: 136,00 Km; 2 - Comprimento total das drenagens: 404,06 Km; 3 - Densidade de drenagem: 0,772; 4 - Frequência de drenagem: 0,672; 5 - Textura topográfica: 2,588; 6 - Comprimento médio dos canais: 1,147 Km; 7 - Desnível total do rio Peruaçu: 246 m; ponto mais alto: 707 m; ponto mais baixo: 443 m; 8 - Comprimento do rio Peruaçu na área de estudo: 67,05 Km.

Segundo Lima (1995), drenagem é uma feição linear negativa, produzida pelo escoamento de água que modela a topografia de uma região, sendo que, ao conjunto dessas drenagens, dá-se o nome de padrão.

Para a região em estudo, o padrão apresentado pode ser classificado como dendrítico, típico de rochas sedimentares estratificadas horizontais, com baixo grau de metamorfismo (Figura 4.8). O grau de integração é médio, assim como a densidade, sendo mais alta na calha do rio Peruaçu e baixa no compartimento geomorfológico Planalto dos Gerais. A tropia é tridirecional devida ao controle estrutural verificado, notadamente NW-SE, N-S e E-W, com grau de controle moderado. A sinuosidade é média, enquanto que a assimetria é forte. A angulosidade é alta e os ângulos de junção são mistos, entre agudos e retos.

Os procedimentos de extração automática de drenagens e de delimitação de bacias apresentaram vantagens operacionais em relação a métodos manuais, como rapidez, maior detalhamento das drenagens de pequenas dimensões em relação à carta topográfica, acurácia e economia de trabalho, conferindo maior objetividade ao resultado final. No entanto, foram observadas limitações devidas à relativa baixa resolução espacial do MDE. Ainda assim, a utilização do MDE baseado em dados SRTM foi preferível ao MDE gerado a partir do par estereoscópico da cenas ASTER, uma vez que este apresentou valores espúrios e terraceamento.



**Figura 4.8:** Mapa da Bacia do rio Peruaçu e padrão de drenagem superficial sobre MDE em relevo sombreado gerado a partir de dados SRTM

#### 4.5.4 – ESPELEOLOGIA

Os dados cadastrais compilados e incorporados à base SIG somam um total de 167 registros de ocorrências de grutas, abrigos, sítios arqueológicos e paleontológicos. Esses dados cadastrais foram levantados junto ao Cadastro Nacional de Cavidades – CNC, ao Sistema de Informações Espeleológicas da SEE, publicações especializadas e no Plano de Manejo do PNCP.

As ocorrências possuem a seguinte distribuição municipal: 95 se encontram no município de Januária, 66 em Itacarambi, 14 em São João das Missões e seis na divisa de Januária e Itacarambi. Deste total, 134 ocorrências possuem coordenadas, distribuídas em 103 grutas (das quais 28 com vestígios arqueológicos e duas com vestígios paleontológicos), quatro abismos e 27 abrigos-sob-rocha com vestígios arqueológicos. Foram incluídos também, os contornos das plantas baixas de 22 grutas, utilizados para a análise da morfologia.

Erros no preenchimento de campos ou ausência de dados mostraram-se bastante comuns nos cadastros, tendo sido corrigidos sempre que possível. Por esse motivo, os resultados de algumas das análises estatísticas apresentaram pouca consistência, apresentando desvios. As ocorrências com esse tipo de problema possuem grau variado de acurácia no posicionamento, tendo sido reposicionados quando possível, através do uso de GPS e por localização em ortofotos ou imagens de satélite.

A concentração destes registros pode ser verificada junto ao cânion principal do rio Peruaçu e na base dos maciços do *front de cuesta*, locais em que se concentraram as pesquisas até o presente, em função da importância ou da facilidade de acesso (Figura 4.9).

Das 134 ocorrências com coordenadas, 99 se localizam no Compartimento Carstificado (73,9%), 22 no Compartimento da Zona de Transição (16,4%) e 13 no Compartimento da Depressão do São Francisco (9,7%).

As cavidades que possuem circulação hídrica perene são as drenadas pelo rio Peruaçu, sendo elas, Gruta Brejal, Arco do André, Gruta Troncos, Gruta Cascudos e Gruta Janelão. Estas cavernas são as mais volumosas, mas não necessariamente as de maior desenvolvimento horizontal. Destaque também para a Gruta Olhos D'Água, localizada na Serra do Cardoso de Minas.

A análise das morfologias das cavernas foi realizada sobre as 22 plantas baixas disponíveis (Figura 4.9), sendo desconsiderados os perfis longitudinais e cortes transversais devido à indisponibilidade destes. Estas seguem padrões lineares (Gruta do Índio, Gruta das Velas, Gruta Ralo d'Água, Abrigo das Cobras, Gruta do Suspiro, Lapa do Rezar, Gruta Caboclo, Gruta do Desprezo, Gruta Bonita, Arco do André, Gruta dos Ossos, Gruta dos Desenhos, Gruta da Hora, Toca da Onça, Gruta Capim Vermelho, Gruta do Carlúcio e Gruta do Santo) e meandranes (Gruta Brejal, Gruta Troncos, Gruta Cascudos, Gruta Janelão e Gruta Olhos d'Água). Os lineamentos relacionados ao desenvolvimento das cavidades foram extraídos de forma manual no *software* ArcGIS 9.1. (Figura 4.10).

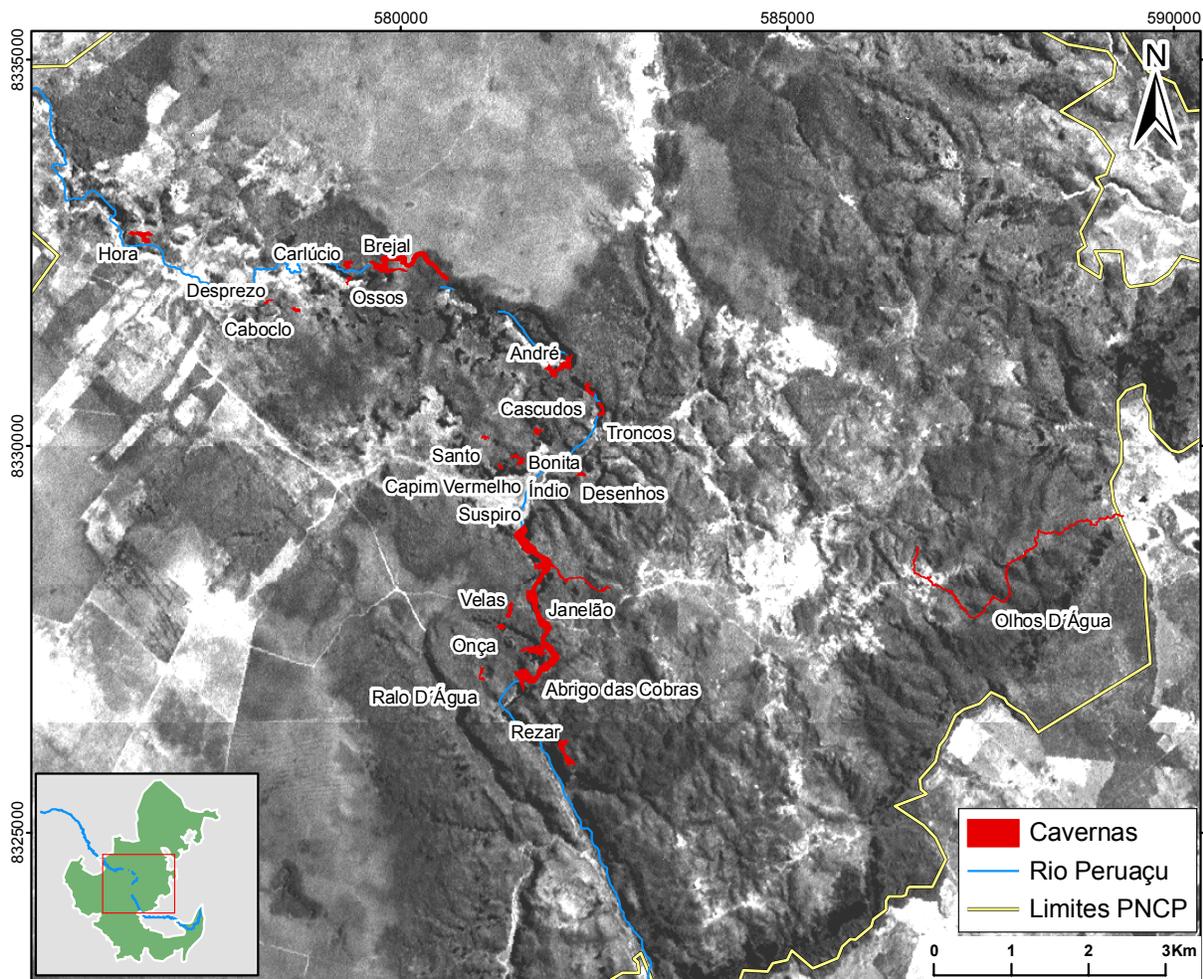
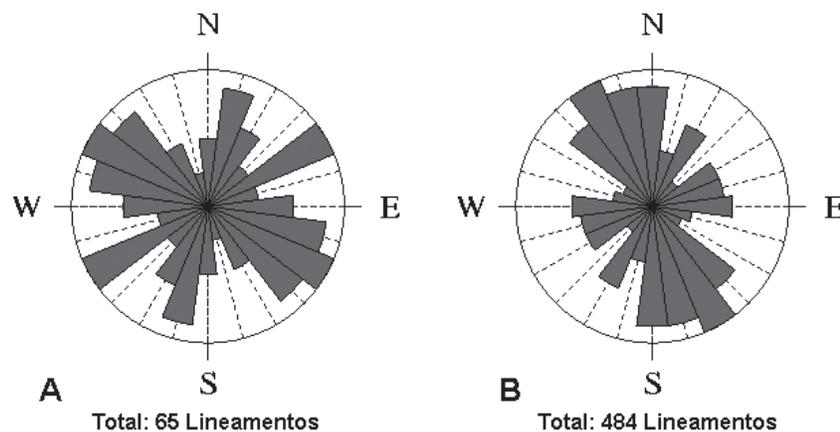


Figura 4.9: Mapa de distribuição das plantas das cavernas sobre banda pancromática do Landsat 7/ETM+

Os maiores desenvolvimentos horizontais são verificados na Gruta Olhos d'Água (9100 m), Gruta Janelão (4740 m), Lapa da Onça (1680 m), Gruta Brejal (1420 m), Gruta Água d'Olhos (1380 m) e Lapa do Meio (1000 m). Os maiores desníveis são verificados na Gruta Janelão (176 m), Gruta Água d'Olhos (135 m), Lapa da Onça (131 m), Gruta Olhos d'Água (126 m), Lapa do Açude (93 m) e Gruta Brejal (72 m). Os maiores volumes são da Gruta Janelão, considerado um dos maiores do mundo, além da Gruta Brejal.



**Figura 4.10: Diagrama de roseta dos lineamentos extraídos dos mapas topográficos cavernas (A) comparados aos lineamentos regionais (B)**

A partir das imagens multiespectrais, mapas geomorfológico, geológico, de lineamentos, declividade, distribuição das cavidades e de dolinas, foram definidas as áreas de potencial espeleológico com o objetivo de orientar futuros trabalhos de exploração em campo. Foram levados em consideração, para definir as áreas de maior potencial, os seguintes parâmetros: cavidades conhecidas, lineamentos e dolinas, quebras de relevo, exposição de carbonatos, posição topográfica, além da ocorrência de vegetação confinada em depressões circulares e ao longo de vales e drenagens.

Definidos esses parâmetros, foi realizada visualmente a análise textural de composições coloridas Landsat ETM+ para delimitação dos polígonos, considerando também, o conhecimento da região pelo intérprete. Foram individualizados vinte e dois polígonos, numa área total de 234,47 Km<sup>2</sup>, ou seja, 11,85% da área de pesquisa. Esta análise não priorizou áreas junto ao cânion principal do rio Peruaçu, já extensivamente percorrido e conhecido. Não foi considerada a dificuldade de acesso a estas áreas e os polígonos não foram hierarquizados em relação ao potencial.

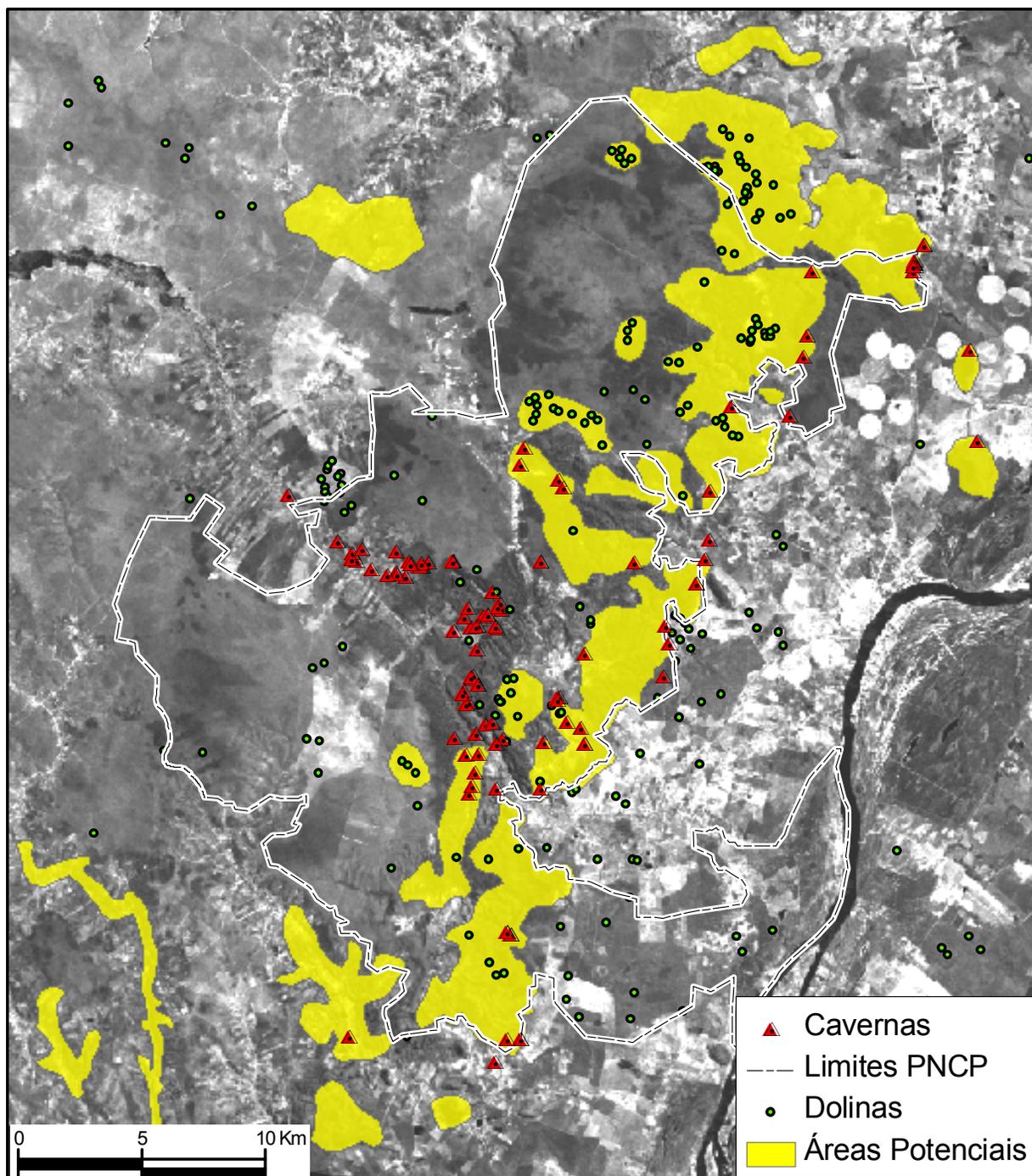


Figura 4.11: Mapa de distribuição das ocorrências de cavernas e áreas de maior potencial espeleológico, exibidas sobre a banda pancromática do ETM+

#### 4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de SIG se mostra ainda incipiente em pesquisas voltadas à caracterização de ambientes cársticos. Sistemas de Informações Geográficas dispõem de ferramentas que diminuem a subjetividade nas análises do meio físico, além agilizar os processos através de operações automatizadas de extração de informações.

Na presente pesquisa, a utilização dessa tecnologia se mostrou muito satisfatória na caracterização da distribuição de atributos relacionados ao ambiente cárstico e de análises espaciais, análises morfométricas, modelagem 3D, geração de cartas, inserção de dados de campo e integração de dados multi-fontes, dando suporte a interpretações geológicas, geomorfológicas, espeleológicas e hidrográficas.

Com o uso do SIG foi possível aplicar parâmetros morfométricos para análise geomorfológica, como amplitude e rugosidade do relevo, declividade e volume. Parâmetros morfométricos foram aplicados também para a análise do padrão de drenagem, como densidade e frequência de drenagens, textura topográfica e comprimento médio dos canais. Estes procedimentos foram maximizados pela extração automatizada da rede de drenagens e delimitação da bacia hidrográfica através de MDE.

Através de análise visual, foi possível localizar dolinas de subsidência, consideradas indicadores secundários de processos de carstificação em sub-superfície. Foi possível também extrair lineamentos regionais e dos desenvolvimentos das cavidades, assim como gerar um mapa de potencial espeleológico, através da delimitação de áreas que possuem feições indicadoras de ocorrência de cavidades. Destaca-se que a definição dessas áreas é de grande interesse para a continuidade dos trabalhos de prospecção de novas cavidades no âmbito do PNCP.

A caracterização espeleológica foi facilitada pelas distribuições espaciais de dados cadastrais e classificação morfológica, o que contribuiu para avaliar a acurácia no posicionamento das ocorrências.

As limitações encontradas dizem respeito à extração automática de drenagens e delimitação de bacias, seja pela relativa baixa resolução espacial do modelo ou pelo algoritmo empregado, que resultou em incongruência em locais de relevo muito plano (proximidades do rio São Francisco), depressões fechadas e drenagens subterrâneas.

## ***CAPÍTULO 5 : CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO***

---

### **5.1 – INTRODUÇÃO**

Este capítulo trata da caracterização de atributos do meio físico da área de estudo, destacando seus elementos da geologia, geomorfologia, hidrografia e espeleologia. Esta caracterização é resultado da conjugação de informações advindas da bibliografia consultada, de observações de campo, de procedimentos resultantes da análise das imagens de sensoriamento remoto, de descrição macroscópica de amostras de rochas coletadas em campo e da interpretação espectro-mineralógica por meio de espectroscopia de reflectância, além de análises espaciais e estatísticas realizadas em ambiente SIG.

### **5.2 - GEOLOGIA**

Na região em estudo, a seqüência carbonática é a litologia mais representativa, englobando 34,5% da área de estudo, seguida das coberturas detríticas, com 29,6%, arenitos Urucuia, com 27,4%, aluviões, com 7,2%, argilitos, com 1,3% e granitóides, com apenas 0,02%.

Excetuando-se a área restrita onde ocorrem os granitóides do embasamento cristalino pré-Bambuú, toda a região de estudo pode ser considerada cárstica, variando apenas a sua situação. Em regiões onde a seqüência carbonática encontra-se recoberta por outra litologia, como os arenitos Urucuia, tem-se uma situação de carste subjacente, que corresponde a um total de 28,6% da área de estudo. Na região onde ocorre a exposição da seqüência carbonática tem-se o carste desnudo, que representa 34,5% da área. Já o carste encoberto corresponde à região de ocorrência de deposições detríticas e aluviões sobre a seqüência carbonática, totalizando 36,8% da área.

A exposição de rochas do carste desnudo sem cobertura pedológica e vegetação é ainda mais restrita, com menos de 0,99% da área de estudo. Os calcários calcíticos expostos representam 0,553% da área, enquanto os calcários dolomíticos perfazem 0,436% (Figura 4.3). Como já foi observado, estes valores são superestimados devido às limitações da classificação espectral das imagens de sensoriamento remoto empregada. Ressalta-se que esta é uma situação típica de carstes tropicais, onde há a predominância de elementos pedológicos e botânicos sobre as rochas calcárias, vindo a

dificultar a delimitação mais precisa dos domínios carbonáticos.

Para a delimitação dos domínios carbonáticos foi empregado um índice de vegetação (NDVI) calculado a partir das imagens de sensoriamento remoto, sendo este entendido como indicador do crescimento e vigor da vegetação verde presente na área à época do imageamento. Com o uso do NDVI, características fisionômicas, ecológicas e florísticas podem ser ressaltadas, diferenciando as comunidades vegetais. As comunidades vegetais diferenciadas através do NDVI foram utilizadas como indicadores secundários de litologias, já que as variações fitofisiográficas estão relacionadas ao substrato rochoso.

Os maiores valores do NDVI estão associados à fitofisiografia ‘cerrado’, relacionada ao Compartimento Planalto dos Gerais, ou seja, aos arenitos Urucuaia. Os valores intermediários do NDVI estão associados à fitofisiografia ‘mata seca de calcário’, que ocorrem nos Compartimentos da Zona de Transição e Carstificado, estando associadas à exposição dos carbonatos.

Amostras de rochas carbonáticas coletadas no carste desnudo durante os trabalhos de campo tiveram sua descrição macroscópica complementada com a interpretação espectro-mineralógica obtida a partir da espectroscopia de reflectância.

Este método de análise permitiu a descrição de variações lito-faciológicas e o detalhamento da coluna estratigráfica nas proximidades do cânion do rio Peruaçu. Foi realizada a discriminação de calcários calcíticos e calcários dolomíticos, além de assinaladas a presença de minerais como Fe e gipsita e elementos botânicos, como líquens, nas amostras analisadas.

Nos calcários calcíticos, a presença de matéria orgânica, responsável pela coloração mais escura das amostras, ocasionou uma diminuição geral dos valores de reflectância e a atenuação das feições de absorção. Os calcários calcíticos estão representados entre as cotas 460 a 700 m de altitude.

Já os calcários dolomíticos, foram discriminados em função dos maiores valores de reflectância, relacionados às colorações mais claras das amostras, além da presença de minerais ferrosos, que apresentaram feições de absorção típicas e acentuada queda de reflectância em direção aos comprimentos de onda do azul. Os calcários dolomíticos foram observados entre as cotas 710 a 745 m.

O conjunto rochoso é considerado sedimentar, uma vez que o metamorfismo parece estar ausente ou incipiente. As litologias do Grupo Bambuí em Januária encontram-se horizontalizadas ou suavemente dobradas, apresentando baixas amplitudes e grandes comprimentos de onda (Martins 1998). Um conjunto de falhamentos normais, denominado Falha de Januária, de direção NE/SW, é observado na região por onde segue o curso do rio São Francisco.

As seqüências carbonáticas e terrígenas da região foram levemente afetadas pela tectônica do Ciclo Brasileiro, apresentando fraturas e falhas de direções NNE/SSW e NW/SE (Piló 1997). São verificadas dobras suaves de natureza simétrica nos calcários e pequenas falhas de baixo ângulo de mergulho.

O diagrama de roseta gerado a partir da extração de lineamentos positivos e negativos sobre o MDE corroborou as observações de Piló (1997) e Martins (1998) para as estruturas lineares da região, tendo apresentado resultados que destacam as direções preferenciais NW-SE, N-S, NE-SW e E-W.

### **5.3 – GEOMORFOLOGIA**

A área de estudo é caracterizada por uma alta geodiversidade, com destaque para feições como cânions, escarpas, paredões lapiezados, cavernas, abrigos-sob-rocha, dolinas de colapso e subsidência, arcos, torres, morros residuais e drenagens subterrâneas. O relevo é tipicamente ruiforme, onde os processos de dissolução contribuem para a erosão remontante que atua sobre o front de cuesta.

Piló (2003) classifica a região como um típico flúviocarste, condicionado pela presença do vale fluvial sobre os carbonatos do Grupo Bambuí e aporte de águas alogênicas, e o divide em quatro compartimentos geomorfológicos.

O Compartimento Planalto dos Gerais está associado aos arenitos Urucuia, tendo relevo aplainado, levemente ondulado e com baixa densidade de drenagens.

O Compartimento da Zona de Transição possui caráter residual, onde se destacam feições como morros residuais tabulares e testemunhos, dolinas de subsidência, representando a transição para o Compartimento Carstificado.

O Compartimento Carstificado está associado aos calcários e dolomitos do Grupo Bambuí,

possuindo relevo muito acidentado e ausência de canais contínuos de drenagem. Processos de dissolução, incisão, deposição e transporte de sedimentos são verificados. É neste compartimento que se observa a maioria das feições cársticas. Pode ser ainda subdividido em quatro sub-compartimentos: topo, fluviocarste, depressões cársticas fechadas e escarpamento escalonado.

O Compartimento da Depressão do São Francisco está associado às coberturas detríticas cenozóicas, apresentando topografia plana e suavemente ondulada, onde se destacam morros testemunhos que se projetam em meio à planície.

Em termos de abrangência, o Compartimento da Zona de Transição domina a paisagem, representando 36,2% da área, seguido do Compartimento da Depressão do São Francisco, com 29,0%, Compartimento Carstificado, com 23,2% e o Compartimento Planalto dos Gerais, com 11,7%.

Índices morfométricos foram calculados no intuito de minimizar os efeitos da subjetividade na análise, assim como servir de parâmetros de comparação para com outras áreas cársticas. O índice de rugosidade apresentou valor de 1,0043, para uma área de 1980 Km<sup>2</sup> e volume de 373,75 Km<sup>3</sup>. A amplitude do relevo é da ordem de 400 m, desde a cota mais baixa, de 440 m, até a cota mais alta, de 840 m.

O mapa de declividade gerado foi definido a partir de cinco classes de declive, apresentando os seguintes resultados: relevo plano, com valores de 0 a 3% de declividade; suave ondulado, entre 3 e 8%; ondulado, entre 8 e 20%; forte ondulado, entre 20 e 45% e escarpado, com valores acima de 45% de declividade (Figura 4.7). Para a área de estudo, destaca-se a prevalência dos relevos planos a suaves ondulados, estando os maiores valores associados aos maciços isolados, cânions e ao escarpamento do front de cuesta.

A partir de análise visual, foram identificadas duzentas e quatro dolinas de subsidência e de colapso, estando estas distribuídas irregularmente em todos os compartimentos geomorfológicos (Figura 4.5 e 5.1).

Estas dolinas estão, em muitos casos, associadas aos lineamentos, demonstrando a estreita relação entre as feições de superfícies com os elementos estruturais e o conseqüente condicionamento tectônico do relevo (Figura 5.1). Somente no Compartimento da Depressão do São Francisco essa relação não pode ser diretamente verificada, devido à dificuldade de se identificar os lineamentos, obliterados pelas coberturas detríticas cenozóicas.

O maior número de dolinas pode ser verificado no Compartimento da Zona de Transição, com 49,0% das ocorrências registradas, seguido do Compartimento da Depressão do São Francisco, com 26,5%, Compartimento Carstificado, com 15,7% e do Compartimento Planalto dos Gerais, com 8,8%. No entanto, essa relação de grandeza da quantidade total de dolinas por compartimento geomorfológico se modifica sensivelmente se considerarmos a densidade de dolinas, isto é, o número total de dolinas por compartimento, dividido pela área. Para o Compartimento da Zona de Transição temos 0,173 dolinas / Km<sup>2</sup>, seguido do Compartimento Planalto dos Gerais com 0,077 dolinas / Km<sup>2</sup>, Compartimento da Depressão do São Francisco com 0,075 dolinas / Km<sup>2</sup> e Compartimento Carstificado, com 0,069 dolinas / Km<sup>2</sup>. Vale ressaltar que esses valores podem estar subestimados, devido à relativa baixa resolução das imagens multiespectrais, dificultando a identificação de um maior número de dolinas e, conseqüentemente, introduzindo desvios amostrais nas análises estatísticas.

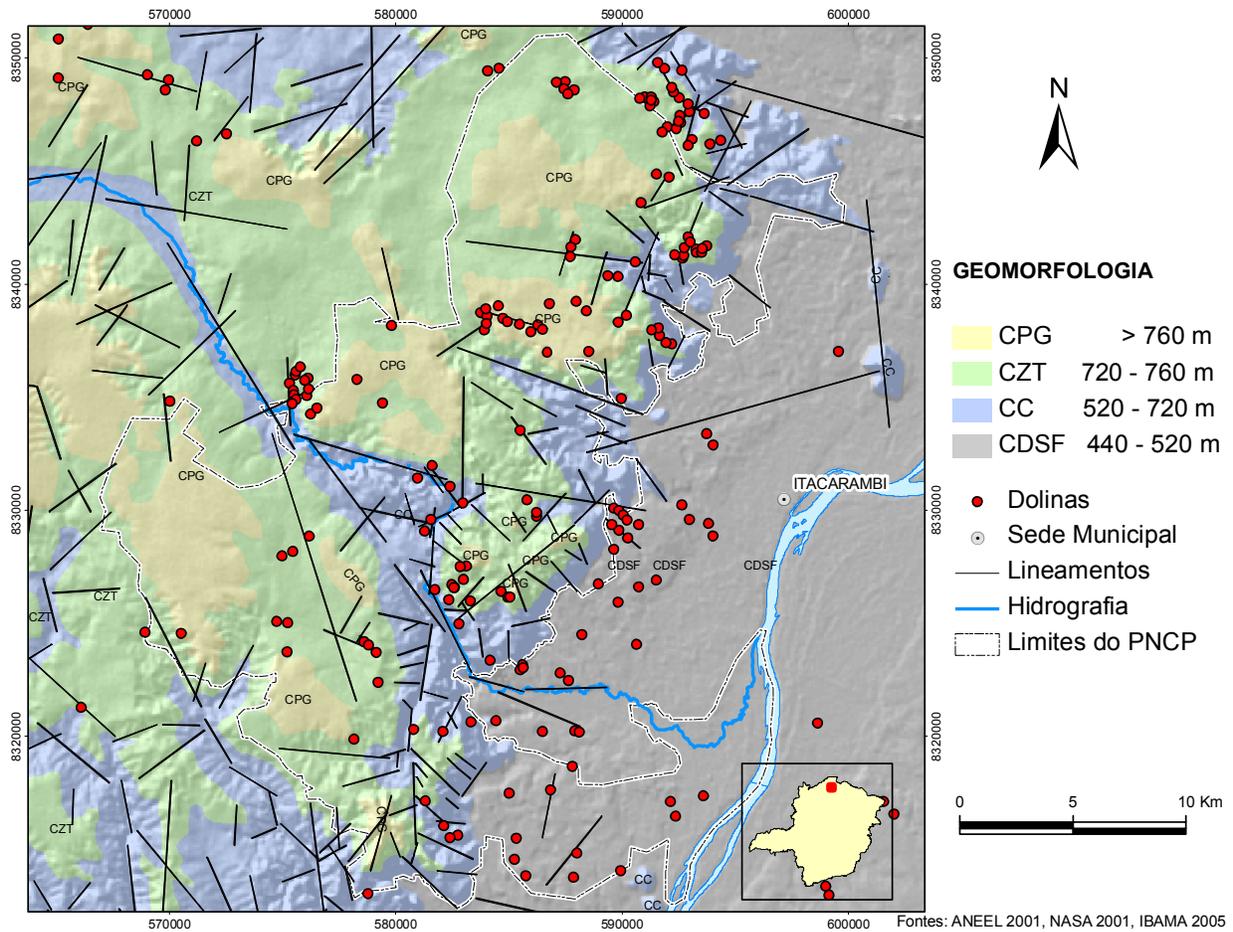


Figura 5.1: Mapa de distribuição de dolinas e lineamentos sobre compartimentos geomorfológicos

## 5.4 – HIDROGRAFIA

As unidades aquíferas da área de estudo, definidas por Ferreira (2003), mantêm estreita relação com as litologias e os compartimentos geomorfológicos, sendo que os cursos hídricos superficiais e subterrâneos da seqüência carbonática apresentam tendências de circulação condicionadas pelas estruturas tectônicas. Estes aquíferos se organizam de forma superposta e integrada.

No Compartimento Planalto dos Gerais, associado aos arenitos Urucuia e crostas lateríticas, a recarga do aquífero se faz por infiltração difusa, por precipitação e também pelo transbordamento do rio Peruaçu nas zonas próximas ao leito em períodos de maior pluviosidade. Este aquífero granular é homogêneo, isotrópico e possui baixa densidade de drenagens, com alto potencial hidrológico e gradiente hidráulico de baixa a média magnitude.

Neste aquífero são encontradas várias lagoas e dolinas de subsidência que estão associadas a processos de dissolução da seqüência carbonática subjacente. Isso parece contradizer a hipótese de Piló (1989), de que este aquífero teria pouca conectividade com o aquífero cárstico em função da baixa permeabilidade dos argilitos que recobrem o topo da seqüência carbonática. A pouca espessura desta litologia, aliada ao fraturamento regional, aumenta a sua porosidade secundária, permitindo a conexão destes dois aquíferos.

No Compartimento da Zona de Transição, os arenitos são limitados dentro da zona não saturada e favorecem a infiltração difusa da recarga regida pela pluviosidade até os calcários (Ferreira 2003).

No Compartimento Carstificado, os calcários são espessos e a recarga é difusa, dando-se através dos solos de alteração, sumidouros, dolinas e do fraturamento, que aumenta sobremaneira a porosidade secundária da seqüência carbonática. Constitui-se num aquífero cárstico fissurado típico, heterogêneo e anisotrópico. As linhas de fluxo seguem a tendência da rede de condutos com direção principal NW-SE e as conexões secundárias NE-SW.

No compartimento da Depressão do São Francisco instala-se um aquífero aluvial, onde a recarga ocorre de forma difusa, pelas águas pluviais no período úmido e também pela infiltração

do rio Peruaçu nos sedimentos inconsolidados das coberturas detríticas da planície. Possui alta porosidade primária e é homogêneo e isotrópico.

Por último, destaca-se o aquífero cristalino, associado a granitóides do Embasamento Cristalino, de ocorrência restrita, logo, com pouca contribuição aos demais. Sua recarga é indireta e se dá através do aquífero cárstico, que recobre esta litologia em quase sua totalidade.

Foram empregados procedimentos para a extração automatizada de drenagens e delimitação de bacias e posterior cálculo de parâmetros quantitativos e análise de parâmetros qualitativos, vindo a contribuir para a definição do padrão de drenagens superficiais.

A área total da bacia do rio Peruaçu dentro dos limites da área de estudo é de 523,11 Km<sup>2</sup> e perímetro de 136 Km. O comprimento total das drenagens é de 404,06 Km, tendo apresentado um índice de densidade de drenagens de 0,772. A frequência de drenagens apresentou o valor de 0,672 e a textura topográfica de 2,588. O comprimento do rio Peruaçu dentro dos limites da área de estudo é de 67,05 Km, dos quais 4,8 Km são subterrâneos, com um desnível de 246 m, desde o ponto mais alto (707 m), até a foz no rio São Francisco (443 m). O rio Peruaçu é a única drenagem perene nos limites do PNCP.

O padrão de drenagens para a área em estudo pode ser classificado como dendrítico (Lima 1995), em geral associado a rochas sedimentares estratificadas horizontais, com baixo grau de metamorfismo. O grau de integração se refere à interação entre as drenagens, cujo percurso deverá ser simples, lógico e pouco contorcido, sendo classificado como médio. A densidade, que representa o número de canais de drenagem por unidade de área, também é média, sendo mais alta na calha do rio Peruaçu e baixa no Compartimento Planalto dos Gerais. A tropia, que indica a orientação do padrão de drenagens, é tri-direcional, relacionada ao controle estrutural, com *trends* NW-SE, N-S e E-W e apresenta grau de controle moderado. Possui sinuosidade média e assimetria forte. Os ângulos de junção das drenagens são mistos, entre agudos e retos e a angulosidade é alta (Figura 5.2).

GRAU DE INTEGRAÇÃO	DENSIDADE	TROPIA	GRAU DE CONTROLE	SINUOSIDADE	ASSIMETRIA	ANGULOSIDADE	ÂNGULO DE JUNÇÃO
ALTO	ALTA	UNIDIRECIONAL	FORTE	CURVOS	FRACA	ALTA	AGUDO
MÉDIO	MÉDIA	BIDIRECIONAL		FRACO		MISTOS	
BAIXO	BAIXA	TRIDIRECIONAL	FRACO	RETILÍNEOS	FORTE	BAIXA	RETO
		MULTIDIRECIONAL					

Figura 5. 2: Quadro de classificação de padrões de drenagens (extraído de Lima 1995)

## 5.5 – ESPELEOLOGIA

A importância e a expressividade do patrimônio espeleológico do PNCP podem ser demonstradas pelo seu conjunto paisagístico, pela diversidade das formas de relevo, pelo potencial científico e turístico e pela concentração e monumentalidade das cavernas. Esse conjunto de atributos coloca o vale do rio Peruaçu como um dos mais importantes sítios espeleológicos e geomorfológicos do Brasil (Piló *et al* 2003).

Estas cavernas estão distribuídas principalmente ao longo do cânion principal do rio Peruaçu (Brejal, Troncos, Cascudos, Janelão), em paredões do cânion principal (Carlúcio, Ossos, Raposa, Bráulio), em cânions menores perpendiculares à calha principal do rio Peruaçu (Lapa dos Desenhos), nos paredões recuados (Caboclo, Bonita, Índio, Capim Vermelho, Boquete) e em maciços residuais (Gruta da Hora, Lapa da Hora). Um segundo grupo de cavernas se localiza no topo do planalto cárstico, não estando associado ao sistema do rio Peruaçu. Estão posicionadas, geralmente, no fundo de dolinas (Água D’Olhos, Abismo do Quintal, Abismo da Liasa e Gruta Olhos D’Água). Destacam-se também, as cavidades localizadas na base da escarpa de erosão remontante, no Compartimento da Depressão do São Francisco (Gruta Olhos do Brioco, Encontro dos Ventos, Cipó, Borboleta, Riacho Seco I e Lapa do Meio).

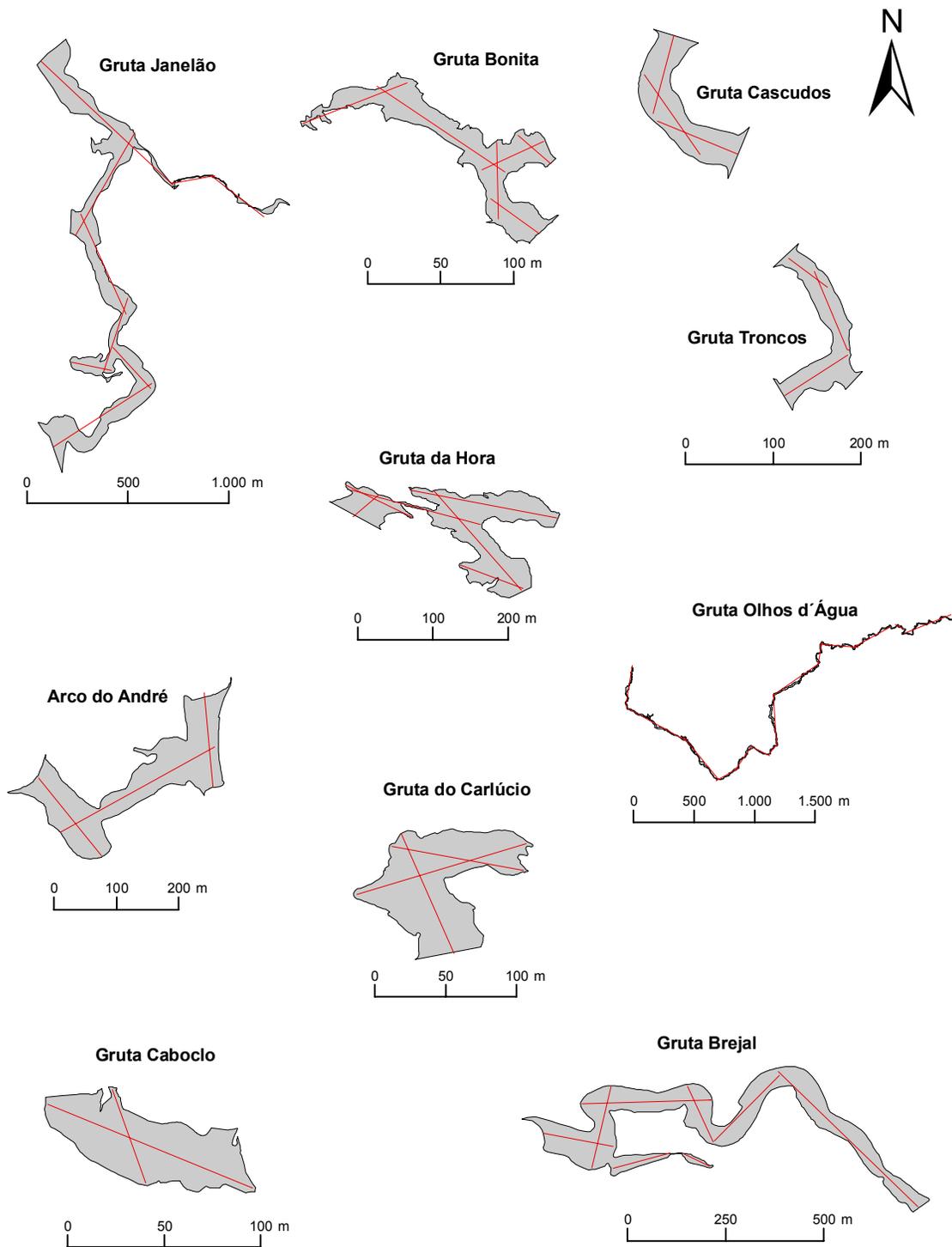
A grande maioria das cavernas se localiza no Compartimento Carstificado, com 73,9% das

ocorrências com coordenadas, seguida do Compartimento da Zona de Transição, com 16,4% e pelo Compartimento da Depressão do São Francisco, com 9,7%.

Do ponto de vista hidrológico, as cavernas podem ser divididas em dois grupos: cavernas drenadas pelo rio Peruaçu e cavernas secas, já desconectadas do aquífero. As cavernas drenadas pelo rio Peruaçu (Brejal, Cascudos, Troncos e Janelão) representam as principais galerias do sistema, associadas ao nível de base atual. As cavernas secas estão posicionadas acima do nível de base atual, em paredões recuados do cânion principal ou em vales secos secundários (Desenhos, Rezar, Caboclo, Bonita e Índio), sendo fragmentos abandonados de galerias tributárias da drenagem preferencial.

A morfologia das principais cavernas está condicionada pelo controle estrutural de planos de acamamento e fraturas, resultando em padrões de desenvolvimento predominantemente lineares ou meandranes, perfis horizontalizados e seções transversais retangulares ou elípticas (Figura 5.3).

O padrão meandrante está representado, principalmente, pelas cavernas drenadas pelo rio Peruaçu, destacando-se as grutas Brejal, Cascudos, Troncos e Janelão. Fora da calha principal do rio Peruaçu destacam-se as grutas Olhos D'Água e Água D'Olhos. Nas primeiras há o predomínio de condutos e salões de grande magnitude, onde os processos de incisão foram responsáveis pela ampliação do volume das cavidades, resultando em dolinas de colapso e a segmentação parcial do curso do rio. Nas últimas, o menor volume é contrabalanceado pela maior extensão em se tratando de desenvolvimento horizontal, além de desníveis mais acentuados.



**Figura 5. 3: Lineamentos sobre plantas baixas das principais grutas do PNCP**

Padrões lineares e/ou angulosos são comumente observados, com destaque para as grutas do Índio, Velas, Ralo d'Água, Suspiro, Rezar, Caboclo, Bonita, Desprezo, Ossos, Desenhos, da Hora, Capim Vermelho e Carlúcio.

Ainda que o controle estrutural regional tenha condicionado os padrões de desenvolvimento das cavidades, percebe-se que não há uma correspondência exata entre os histogramas dos lineamentos do relevo e os lineamentos tomados a partir das plantas baixas das cavernas (Figura 4.10).

Este fenômeno, já observado por Ferreira (2003), pode ser interpretado como um desvio das direções de condutos de iniciação no topo dos cânions subterrâneos, formadores de cânions meandranes, divergindo assim da direção de iniciação, atualmente no topo das cavernas. Por outro lado, pode ser entendido também como um desvio amostral, considerando-se o menor número de lineamentos tomados para os condutos das cavernas (65), se comparados com o número de lineamentos regionais superficiais (484).

## ***CAPÍTULO 6 : CONCLUSÕES***

---

As contribuições do sensoriamento remoto para a caracterização do meio físico da área em estudo se deram no âmbito da espectroscopia de reflectância e do processamento digital de imagens multiespectrais dos sensores ETM+ e ASTER.

A espectroscopia de reflectância permitiu a análise qualitativa das amostras de carbonatos coletadas nas proximidades do cânion principal do rio Peruaçu, dando suporte à caracterização espectro-mineralógica, procedimento complementar à descrição macroscópica.

Estes procedimentos resultaram no detalhamento da coluna estratigráfica proposta para a região, tendo propiciado a discriminação lito-faciológica entre calcários calcíticos (amostras P50, P21, P20, P23, P14, P15 e P30) e dolomíticos (amostras P34, P12 e P10), além de ter assinalada a presença de Fe, gipsita e argilo-minerais nas amostras.

Com a espectroscopia de reflectância, foi possível estabelecer que a presença de matéria orgânica nas amostras de calcário calcítico, além da presença de Fe nas amostras de calcário dolomítico, foram os fatores responsáveis pela discriminação destas duas litofácies carbonáticas. A presença de matéria orgânica ocasionou a redução na reflectância total dos espectros de calcários calcíticos, enquanto que sua ausência nos calcários dolomíticos aumentou a reflectância das amostras, gerando padrões distintos de resposta espectral.

Os espectros obtidos com a espectroscopia de reflectância foram inseridos numa biblioteca espectral, sendo reamostrados para o sensor ASTER, tendo como objetivo, servir de referência (*end-members*) para a classificação espectral por meio da técnica SAM.

A utilização de técnicas de processamento digital de imagens visou facilitar a identificação e a extração de informações contidas nas imagens de sensoriamento remoto, para posterior interpretação.

Com a aplicação das técnicas de PDI foi possível realizar a discriminação litológica e litofaciológica a partir de composições coloridas de diferentes bandas espectrais do ASTER, gerar índices de vegetação, realizar transformações e realces espectrais, além de classificações espectrais de elementos da superfície

através do emprego do classificador hiperespectral SAM.

As composições coloridas para as cenas Landsat-7/ETM+ e Terra/ASTER foram definidas a partir dos melhores resultados obtidos com análise visual. Ainda ao nível das composições coloridas, foi possível discriminar os carbonatos de arenitos, além de discriminar os calcários calcíticos de calcários dolomíticos através de análise visual textural.

Os melhores ajustes de contraste foram obtidos por meio do contraste linear com 2% de saturação. A utilização da transformação HSI também apresentou resultados positivos em termos de análise visual, no sentido de remover a correlação espectral inter-bandas e produzir composições coloridas com alto conteúdo visual de informação sobre os principais tipos de materiais superficiais.

O índice de vegetação permitiu a discriminação de comunidades vegetais, importantes indicadores ecológicos da área. e também como indicador secundário de litologias, uma vez que as variações nas fitofisiografias da área de estudo estão relacionadas diretamente ao substrato rochoso.

Este índice foi gerado com sucesso a partir da cena do sensor ETM+, não tendo apresentado os mesmos resultados positivos com a cena ASTER. A partir do NDVI foi observada a estreita correlação entre a fitofisiografia “cerrado” para com os arenitos da Formação Urucua e a fitofisiografia “mata seca de calcário” para com os domínios carbonáticos. O emprego do índice de vegetação foi importante em função da cobertura vegetal observada na região, ocasionando pouca exposição das rochas carbonáticas.

A técnica de classificação hiperespectral SAM foi utilizada para calcular a similaridade espectral entre espectros de referência e espectros de reflectância dos pixels da imagem. Os procedimentos empregados utilizaram espectros de referência obtidos pela técnica de espectroscopia de reflectância, a partir da seleção de *end-members* no diagrama de dispersão multidimensional e a partir de classes geradas na própria imagem ASTER.

Tanto a classificação obtida com a extração automatizada de *end-members* através da análise da pureza do pixel, quanto a utilização de espectros de referência tomados em laboratório, não apresentaram resultados que contribuíssem para os objetivos da pesquisa.

No primeiro caso, acredita-se que os materiais alvo não se encontravam nas extremidades da nuvem de pontos observada no visualizador n-dimensional, em razão de serem misturas espectrais compostas por diferentes tipos de materiais superficiais. Já a discrepância entre os espectros de laboratório, quando comparados aos espectros tomados a partir de pixels da imagem é a causa provável dos resultados insatisfatórios no segundo caso. Isso pode ser explicado por fatores como imprecisão na correção atmosférica da imagem ASTER, além de misturas espectrais de vários materiais presentes no interior de cada pixel.

O resultado da classificação SAM a partir de espectros médios obtidos por pontos de treinamento (ROI's) mostrou-se satisfatório para a discriminação de calcários calcíticos de calcários dolomíticos e classificação de solos expostos e áreas de cultivo. No entanto, a discriminação entre as fitofisiografias “cerrado” e “mata seca” não foi efetiva.

A extração de lineamentos foi beneficiada com a utilização de filtragens direcionais por convolução sobre MDE obtido a partir dos dados SRTM. Seu emprego propiciou o realce de feições positivas e negativas de relevo, perpendiculares aos azimutes de iluminação.

Os resultados obtidos com o PDI serviram também, como suporte ao refinamento de mapas geológicos e geomorfológicos pré-existentes, atualização da malha viária e localização de feições indicativas de áreas de maior potencial espeleológico.

A utilização de GPS foi de fundamental importância para o bom desempenho dos levantamentos em campo. Este serviu para a orientação e registros de caminhamentos. Com seu uso foi possível tomar as coordenadas dos pontos descritos e pontos de coleta, posicionar ou corrigir posicionamentos de cavidades, plotar os pontos de registros fotográficos, de observações geológicas, geomorfológicas e espeleológicas e gerar pontos de controle no terreno (GCP's) para efeito de correção geométrica das imagens.

Nesta pesquisa, o SIG foi utilizado para integrar dados de fontes e formatos distintos, produzir cartas e gerar dados estatísticos, vindo a contribuir para a diminuição da subjetividade na descrição dos componentes dos relevos cársticos.

Inicialmente foram executadas operações relativas à cartografia digital, com a adequação de formatos de arquivos, correções de topologias, verificações e refinamentos de mapas pré-existentes, vetorizações e

registro de imagens raster.

Com a geração de modelos digitais de elevação a partir de dados SRTM, imagem ASTER e ortofotocartas, foi possível obter uma melhor compreensão de aspectos da geomorfologia e hidrografia. Modelos digitais de elevação permitiram a geração de perfis topográficos, extração de lineamentos, mapas de declividade e fatiamento do relevo. Possibilitaram também a automatização de tarefas como a extração de curvas de nível, drenagens e delimitação de bacias hidrográficas.

Estes modelos serviram de suporte para o refinamento de mapas, para o cálculo de parâmetros morfométricos, geração de modelos 3D realísticos em perspectivas isométrica a partir da integração com produtos de PDI e animações de sobrevôos para a análise visual em perspectiva tri-dimensional.

Foram realizadas análises espaciais e estatísticas, privilegiando aspectos da geologia, geomorfologia, hidrografia e espeleologia. Foram calculadas as distribuições espaciais de litologias, assim como a situação do carste e gerados diagramas de roseta dos lineamentos extraídos. No que tange à geomorfologia, foram calculadas as áreas dos compartimentos geomorfológicos e os parâmetros morfométricos (rugosidade, declividade, amplitude do relevo), possibilitando a realização de análises quantitativas, complementares à abordagem qualitativa.

A extração automatizada da rede de drenagens e o cálculo dos parâmetros quantitativos contribuíram para a definição e a caracterização do padrão da rede de drenagens superficiais da área de estudo.

O SIG propiciou também a compilação dos dados cadastrais de cavernas, sítios arqueológicos e paleontológicos, sendo de suma importância para a correção dos posicionamentos das ocorrências. Erros no preenchimento de campos das bases pré-existentes, ausência e/ou erros nos dados se mostraram muito comuns, sendo corrigidos sempre que possível.

A caracterização do patrimônio espeleológico privilegiou aspectos como a localização das áreas de maior densidade de ocorrências, associação com a circulação hídrica, padrões morfológicos e dimensões associadas. No entanto, as inconsistências na base cadastral geraram desvios significativos.

Por fim, foi gerado um mapa de potencial espeleológico a partir de análise visual integrada

do conjunto de dados anteriormente descritos, tendo sido considerados alguns parâmetros como a distribuição dos registros das ocorrências, proximidade a lineamentos, quebras de relevo, exposição de carbonatos, posição topográfica, ocorrência de dolinas e de vegetação confinada em depressões circulares e ao longo de vales e drenagens. Este mapa de potencial tem o propósito de servir de orientação a futuros trabalhos de exploração em campo.

As limitações encontradas na consecução dos objetivos deste trabalho dizem respeito, principalmente, à relativa baixa resolução espacial dos dados SRTM e imagens multiespectrais, à cobertura das ortofotos limitada ao cânion principal do rio Peruaçu, à dificuldade no uso do GPS em terrenos muito acidentados ou com vegetação muito densa e à pouca exposição dos carbonatos.

Em seu conjunto, o emprego de técnicas de processamento digital de imagens multiespectrais, aliado à utilização de sistemas de informações geográficas e uso de GPS, contribuíram para a caracterização de aspectos do meio físico do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, ao dispor de ferramentas que vieram a diminuir a subjetividade das análises, além de agilizar os processos através da automatização de tarefas.

Interpretações geológicas, geomorfológicas, hidrográficas e espeleológicas foram otimizadas através de análises espaciais, morfométricas, modelagens 3D, integração de dados multi-fontes e geração de cartas, vindo a complementar as informações da bibliografia disponível.

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

---

- Abrams, M., Hook, S. (2003). ASTER User Handbook Version 2. Disponível em: [http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_Documents/aster\\_user\\_guide\\_v2.pdf](http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf). Acessado em 21/05/2006.
- Almeida, F. F. M. (1977). O Cráton São Francisco. *In: Revista Brasileira de Geociências* 7(4): 349-364.
- Alvarenga, B. S. *et alii* (2003). O Ensino de Conceitos e Práticas de Espectrorradiometria Laboratorial: estudo de caso com solos do estado de São Paulo. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XI, Anais*, p. 739-747.
- ANEEL (2000). Sistema de Informações Georreferenciadas de Energia e Hidrologia - HIDROGEO, ANEEL.CD-ROM.
- Arcoverde, G. F. B. *et alii* (2005). Mapeamento pedológico em relevos cársticos a partir da análise morfométrica. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, Anais*, p. 1725-1732.
- Barbosa, J. A. *et alii* (2005). O Sensoriamento Remoto na proposição de plano de uso em unidades de conservação: estudo de caso. *In: SBSR, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, Anais*, p. 811-818.
- Barros, R. S. *et alii* (2005). Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, Anais*, p. 3997-4004.
- Bedell, R. (2004). Remote Sensing in Mineral Exploration. *In: Society of Economic Geologists NewsLetter* 58: 7-14.
- Bizzi, L. A. *et alii* (2003). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Texto, Mapas e SIG. Brasília: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 692 p.
- Boardman J. W.; Kruse, F.A. (1994). Automated spectral analysis: A geologic example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: *In: Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, 10, Proceedings*, MI, I-407 - I-418.
- Brasil, CPRM. (2002). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil Escala 1:2.500.000. Cd-Rom.
- Brasil (1982). Projeto RADAMBRASIL ao milionésimo. Folha Brasília SD 23.
- Braun, O. P. G. (1968). Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 22, Anais*.

- Carvalho, J. A. A., Silva, F. C. A. (2005). Aplicação de Técnicas de Processamento Digital de Imagens para a Caracterização do Padrão dos Lineamentos Frágeis na Região de Santana do Acaraú - CE. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12, *Anais*, p. 177-1724.
- Chiavegatto, J. R. S. (1992). Análise Estratigráfica das Sequências Tempestíticas da Formação Três Marias (Proterozóico Superior), na Porção Meridional da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. Ouro Preto, Universidade Federal de Ouro Preto. 216 p.
- Chiavegatto, J. R. S.; Dardenne, M. A. (1997). Contribuição à sedimentologia e estratigrafia do Grupo Bambuí no Norte de Minas Gerais. *In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, 9, *Anais*.
- Clark, R. N. (1999). Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. *In: A. Rencz (ed.) Manual of Remote Sensing Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences*. New York, John Wiley & Sons, Inc. p. 17-55.
- COMIG (1994). Nota explicativa dos mapas Geológico, Metalogenático e de Ocorrências Mineraias do Estado de Minas Gerais - Escala 1:1.000.000. Pedrosa-Soares, A. C.; Dardenne, M. A.; Hasui, Y; Castro, F. D. C.; Carvalho, M. V. A. Belo Horizonte. 97p.
- Costa, E. R. (1999). Geologia Ambiental do Vale do Rio Peruaçu, Minas Gerais - Brasil. *In: Revista Espeleologia* (10): 41-43.
- Crósta, A. P. (1989). Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain. *In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, 7, *Anais*, p. 1173-1187.
- Crósta, A. P. (1992). Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas: IG/UNICAMP, 170p.
- Crósta, A. P. *et alii* (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *In: International Journal of Remote Sensing* 24(2), p. 4233-4240.
- Deen, H. M. C. (2003). Lithological Mapping of the Bar Al Hickman and Shuaiba Carbonate Facies using Hyperspectral Data in Oman. Master Dissertation, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. ENSCHEDE: 99 p.
- Dardenne, M. A. (1978). A Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil central. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, *Anais*.
- Drury, S. A. (1993). *Image Interpretation in Geology*. (2 ed.) London, Chapman & Hall. 283 p.

- Drury, S. A. (2001). *Image Interpretation in Geology*. (3rd ed) London, 290 p.
- Ferrari, J. A. *et al* (1998). Caracterização Morfométrica de uma Superfície Cárstica do Vale do Ribeira, São Paulo (Núcleo Caboclos - PETAR). *In: Revista do Instituto de Geólogos de São Paulo*, **19**(1/2): p. 9-17.
- Franca-Rocha, W. *et alii* (2003). Gis Modeling for Mineral Potential Mapping of Carbonate-Hosted Pb-Zn Deposits. *In: Revista Brasileira de Geociências* 33(2-suplemento): 191-196.
- Gaffey, S. J. (1986). Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35 - 2.22 microns): calcite, aragonite and dolomite. *In: American Mineralogist*, **71**: 151-162.
- GBPE (1999). Levantamento Espeleológico da Área de Proteção Ambiental - APA - Cavernas do Peruaçu : Subsídios para o Plano de Manejo. Projeto FNMA/MMA - Convênio 035/97. Belo Horizonte. 130 p.
- Gomes, M. F. ; Maillard, P. (2003). Mapeamento Fitogeográfico das Unidades de Conservação do Peruaçu Utilizando Dados do Sensor ETM de Landsat: uma Abordagem Multiespectral e Textural. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 11, *Anais*, p. 2753-2761.
- Hubbard, B. E. *et alii* (2003). Comparative Alteration Mineral Mapping Using Visible to Shortwave Infrared (0.4-2.4  $\mu\text{m}$ ) Hyperion, ALI, and ASTER Imagery. *In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **41**(6): 1401-1409.
- IBAMA (2005a). Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. Encarte 1 - Contextualização da Unidade de Conservação. *In: IBAMA. Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. CSD-GEOKLOCK. Brasília, DF.*
- IBAMA (2005b). Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. Encarte 2 - Análise Regional. *In: IBAMA. Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. CSD-GEOKLOCK. Brasília, DF.*
- IBAMA (2005c). Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. Encarte 3 - Análise da Unidade de Conservação. *In: IBAMA. Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. CSD-GEOKLOCK. Brasília, DF.*
- IBAMA (2005d). Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. Encarte 4 - Planejamento da Unidade de Conservação. *In: IBAMA. Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. CSD-GEOKLOCK. Brasília, DF.*
- Jensen, J. R. (1995). *Introductory Digital Image Proceeding: A Remote Sensing Perspective* (2 ed.) Prentice Hall.

- Kattah, S. S. (1991). Análise Faciológica e Estratigráfica do Jurássico Superior/Cretáceo Inferior na Porção Meridional da Bacia Sanfranciscana, Oeste do Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto. 227p.
- King, L. C. (1956). A Geomorfologia do Brasil Oriental. *In: Revista Brasileira de Geomorfologia* 18(2).
- Köhler, H. C. *et alii* (1999). Land Use in the Tropical Karst - the Case of Peruaçu, Januária and Jaíba; SE Brazil. *In: International Journal of Speleology* **28B** (1/4): 169-173.
- Leal, L. R. *et al* (2003). Definição de Unidades Geomorfológicas a Partir de Imagens de Dados Morfométricos na Bacia do Rio Grande (BA). *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, Anais*, p. 2055-2062.
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. (1994). Remote sensing and image interpretation (3rd ed.). New York, John Wiley & Sons, Inc. 700 p.
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. (2004). Remote sensing and image interpretation (5rd ed.). New York, John Wiley & Sons, Inc. 763 p.
- Lima, M. I. C. (1995). Introdução à Interpretação Radargeológica. Rio de Janeiro: IBGE. 124 p.
- Lima, V. S. (2003). Assinaturas Espectrais de Gossans Associados a Mineralizações de Pb-Zn-Ba na Bacia de Irecê (BA): Um Estudo de Caso Baseado em Dados dos Sensores TM e ASTER. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UNICAMP, 172 p.
- Lopes, O. F. (1981). Evolução Paleogeográfica e estrutural da porção central da Bacia Bambuí, no norte do Estado de Minas Gerais. *In: Revista Brasileira de Geociências* 11(2).
- Loughlin, W. P. (1991). Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **57**(9): 1163-1169.
- Martins, J. C. (1998). Mapeamento Geológico de parte das Folhas de Januária (parte sul) e São João da Ponte (parte norte), Norte de Minas Gerais. Monografia. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto. 52 p.
- Mather, P. (1999). Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. New York: John Wiley & Sons. 366 p.
- Meer, F. v. d. (1996). Spectral mixture modelling and spectral atratigraphy in carbonate lithofacies mapping. *In: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **51**: 150-162.

- Meneses, P. R.; Madeira Netto, J. da S. (orgs.) (2001). Sensoriamento Remoto - Reflectância dos Alvos Naturais. Brasília, Editora UnB. 262 p.
- Ministério das Minas e Energia. (1982). Projeto RADAMBRASIL Folha SD.23 Brasília. Levantamento de Recursos Naturais, Volume 29. Capítulo de Geologia. Rio de Janeiro.
- Moura, M. T. T. (1997). A Evolução do Sítio Arqueológico Lapa do Boquete na Paisagem Cárstica do Vale do rio Peruaçu: Januária (MG). Dissertação de Mestrado. Departamento de Geografia; Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. 214 p.
- Müller, M.; Garcia, K. S. (2001). Modelos digitais de terreno em escalas globais e sua utilização em Recursos Hídricos. *In: Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*, 14.
- Ninomiya, Y. (2003). Rock Type Mapping with Indices Defined for Multispectral Thermal Infrared ASTER Data: Case Studies. *In: Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications and Geology V. II*, s.l., Manfred Ehlers.
- Oliveira, C. J. S. (2001). Extração Automática dos Parâmetros Quantitativos de uma Rede de Drenagem Superficial. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 10, *Anais*, p. 1329-1331.
- Piló, L. B. (1989). A morfologia cárstica do baixo curso do rio Peruaçu, Januária/Itacarambi, MG. Monografia de Bacharelado. Departamento de Geografia do Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais. 80 p.
- Piló, L. B. (1997). Caracterização Regional do Carste do Vale do Rio Peruaçu. *In: Revista O Carste* 9 (2): 22-29.
- Piló, L. B.; Rubbioli, E. (2003). Cavernas do Vale do Rio Peruaçu (Januária e Itacarambi), MG - Obra-prima do carste brasileiro. *In: Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. C. Schobbenhaus *et alii* (eds.). Brasília, DNPM/CPRM/SIGEP. V1. p 453-460.
- Pinto, C. P.; Martins-Neto, M. A. (eds.) (2001). Bacia do São Francisco - Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: S.B.G.- MG. 349 p.
- Porfírio, G. C., Boggione, G. A. (2005). Avaliação de métodos de classificação em ortofotocartas digitais para identificação do uso e ocupação do solo. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12, *Anais*. p. 4259-4264.
- Poursaleh, S. (2004). Separation of Carbonates by Using PCA on ASTER Bands (Com. Pess).

- Rabus, B. *et alii* (2003). The shuttle radar topography mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborn radar. In: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (57): 241-262.
- Ramsey, J. *et alii* (2002). Automated Remote Sensing with Near Infrared Reflectance Spectra: Carbonate Recognition. In: Data Mining and Knowledge Discovery 6: 277-293.
- Rajesh, H. M. (2004). Application of Remote Sensing and GIS in Mineral Resource Mapping - An Overview. In: Journal of Mineralogical and Petrological Sciences 99: 83-103.
- Rowan, L. C.; Mars, J. C. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. In: Remote Sensing of Environment 84: 350-366.
- Sabine, C. (1999). Remote Sensing Strategies for Mineral Exploration. Remote Sensing for the Earth Sciences - Manual for Remote Sensing. In: A. Rencz. Manual of Remote Sensing Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences. New York, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing / John Wiley and Sons: 375-447.
- Sabins, F. F. (1997). Remote Sensing - Principles and Interpretation (3rd ed) New York, W. H. Freeman. 494 p.
- Sabins, F. F. (1999). Remote Sensing for Mineral Exploration. In: Ore Geology 14: 157-183.
- Schobbenhaus, C. (coord.) (1984). Geologia do Brasil; Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente incluindo Depósitos Mineraiis. Escala 1:2.000.000. Brasília, DNPM.
- Silva, A. B. (2003). Sistemas de Informações Geo-referenciadas: Conceitos e Fundamentos. Campinas: Editora UNICAMP. 236 p.
- Silva, B. S. G., Valeriano, D. M. (2003). Georeferenciamento e análise da correção atmosférica para o cálculo de albedo usando o sensor Landsat ETM+. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, Anais. p. 2143-2150.
- Silva, C. M. T.; Simões, P. R. (2004). Geoespeleologia da Gruta do Janelão (PARNA Cavernas do Peruaçu). In: Encontro Brasileiro de Estudos do Carste, 1, Anais.
- Simões, P. R.; Pereira Filho, M. (2002). O Sistema de Informações Espeleológicas da Sociedade Excursionista e Espeleológica - S.E.E. In: Revista Espeleologia, 11: 34-37.

- Souza Filho, C. R.; Crósta, A. P. (2003). Geotecnologias Aplicadas À Geologia. *In: Revista Brasileira de Geociências* **33**(2): 1-4.
- Szukalski, B. W. (2002). Introduction to Cave and Karst GIS. *In: Journal of Cave and Karst Studies* **64**(1): 3 p.
- Valeriano, M. M. *et al* (2001). Extração de rede de drenagem e divisores por processamento digital de dados topográficos. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Anais*. P. 517-524.
- Valeriano, M. M. (2005). Modelo digital de variáveis morfológicas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, Anais*. p. 3295-3602.
- White, W. B. (1988). *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. New York, Oxford University Press, Inc.
- Yamagushi, Y.; *et alii* (1998). Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). *In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **36**(4): 1062-1071.
- Yamagushi, Y.; Naito, C. (1999). Spectral Indices For Lithologic Discrimination Using the ASTER SWIR Bands. *In: International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, 13, Anais*, p. 151-157.
- Yamagushi, Y.; Takeda, L. (2003). Mineralogical Mapping by ASTER in Cuprite, Nevada, USA. *In: Asian Journal of Geoinformatics* **3**(3): 17-23.
- Zullo-Jr, J.; Bezerra, P. C. (1993). Correção Atmosférica de Imagens de Satélite utilizando o 5S. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, Anais*. 7 p.