

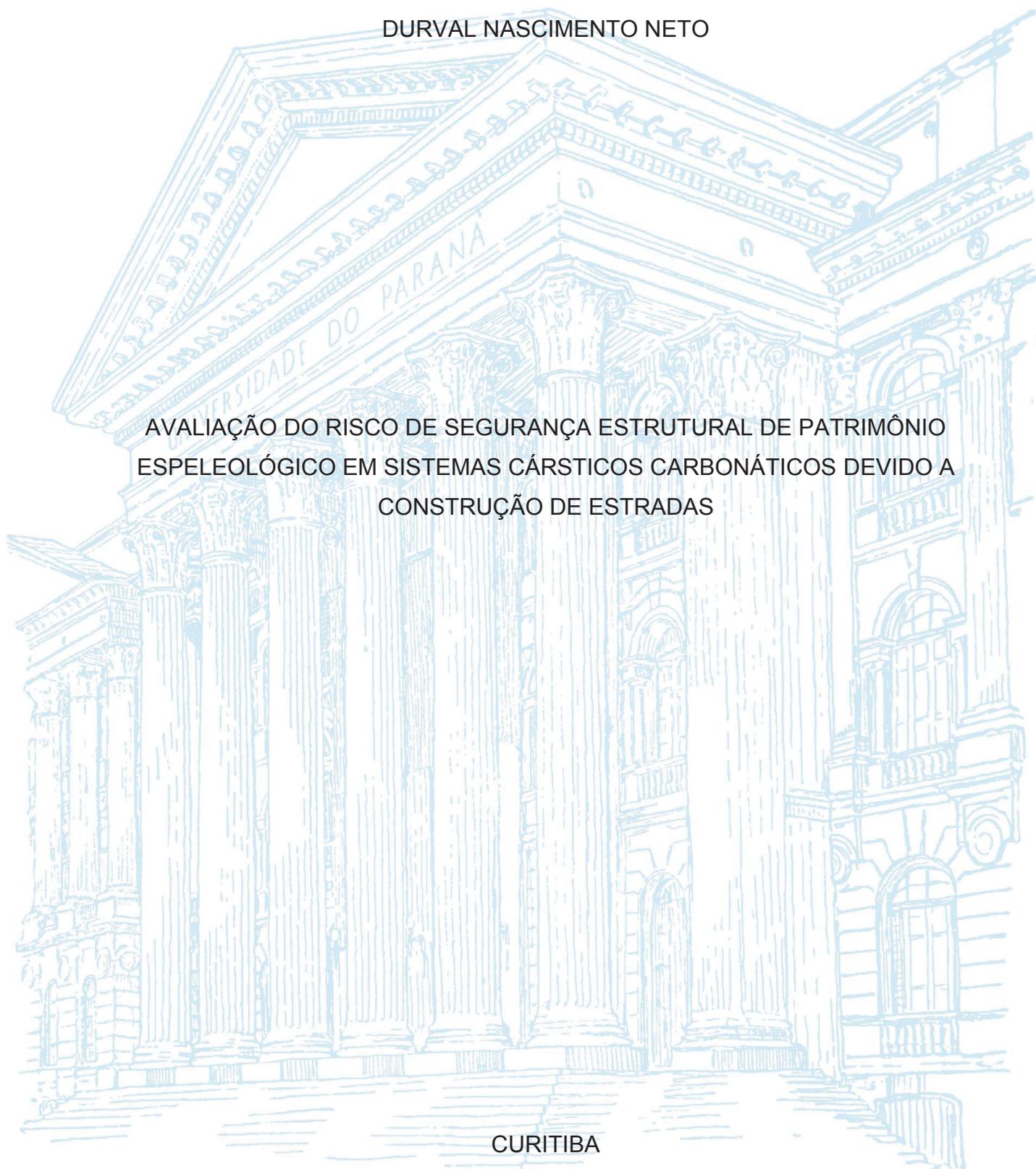
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DURVAL NASCIMENTO NETO

AVALIAÇÃO DO RISCO DE SEGURANÇA ESTRUTURAL DE PATRIMÔNIO
ESPELEOLÓGICO EM SISTEMAS CÁRSTICOS CARBONÁTICOS DEVIDO A
CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS

CURITIBA

2020



DURVAL NASCIMENTO NETO

AVALIAÇÃO DO RISCO DE SEGURANÇA ESTRUTURAL DE PATRIMÔNIO
ESPELEOLÓGICO EM SISTEMAS CÁRSTICOS CARBONÁTICOS DEVIDO A
CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial a obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de Concentração: Geologia Ambiental. Linha de Pesquisa: Geoconservação e patrimônio geológico

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

CURITIBA

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

N244a Nascimento Neto, Durval

Avaliação de risco de segurança estrutural de patrimônio espeleológico em sistemas cársticos carbonáticos devido a construção de estradas [recurso eletrônico]/ Durval Nascimento Neto – Curitiba, 2020.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Área de Concentração: Geologia Ambiental. Linha de Pesquisa: Geoconservação e patrimônio geológico.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

1. Patrimônio geológico. I. Fernandes, Luiz Alberto. II. Ferreira, Francisco José Fonseca. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.
CDD 551

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA -
40001016028P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **DURVAL NASCIMENTO NETO** intitulada: **AValiação DO RISCO DE SEGURANÇA ESTRUTURAL DE PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO EM SISTEMAS CÁRSTICOS CARBONÁTICOS DEVIDO A CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS**, sob orientação do Prof. Dr. LUIZ ALBERTO FERNANDES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa. A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 30 de Junho de 2020.

Assinatura Eletrônica
07/07/2020 18:43:37.0
LUIZ ALBERTO FERNANDES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
08/07/2020 13:44:03.0
WILSON SHOJI IYOMASA
Avaliador Externo (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO
ESTADO DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica
07/07/2020 15:32:06.0
RENATO LUIZ PRADO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica
07/07/2020 19:50:13.0
RICARDO GALENO FRAGA DE ARAUJO PEREIRA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA)

Assinatura Eletrônica
13/07/2020 11:19:42.0
GERMÁN MARCELO MARTINS VINUEZA FREIRE
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA-CENTRO POLITÉCNICO-UFPR - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 81531-990 - Tel: (41) 3361-3365 - E-mail: posgeol@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 45171

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 45171

GRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto de Transportes e Tecnologia de Infraestrutura da UFPR, em especial ao Prof. Dr. Eduardo Rattón e todos os colegas de pesquisa pela dedicação e envolvimento profissional neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes, pela orientação, sempre com respeito e palavras de incentivo.

Aos professores e colaboradores do curso de Pós-Graduação em Geologia do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná,

Ao grupo de pesquisa do CNPq/UFPR em Geoconservação e Patrimônio Geológico, pelo convite para participar deste seleto time de pesquisadores;

Ao LPGA - Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada da UFPR e ao Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira.

Ao governo brasileiro, representado pelo Ministério dos Transportes através do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes.

Minha família, em especial a minha esposa e companheira de todas as horas Elizangela Furquim Nascimento e nossas filhas Nathália, Vitória e Letícia.

RESUMO

Antes da construção de estradas em regiões com potencial de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas é necessário a prospecção, identificação e caracterização do grau de relevância das cavernas encontradas, para então avaliar os riscos de impactos ao patrimônio espeleológico e sua respectiva área de influência. A legislação brasileira estabelece que estudos para determinar a área de influência devem ser realizados e na ausência destes, assume-se uma distância de 250 m à esta área, a partir do contorno em projeção convexa superficial. Ainda se discute quanto a adoção de um método objetivo para determinar o limite de segurança estrutural das cavidades impactadas pela construção de rodovias, bem como sobre a validade do estabelecimento de uma distância padrão que assegure essa segurança. A pesquisa partiu da hipótese de que seria possível determinar uma zona de segurança estrutural para os possíveis impactos causados pela implantação de uma rodovia em área composta de sistemas cársticos carbonáticos. O estudo de caso foi realizado em segmento não pavimentado da rodovia BR-135/BA, no município de São Desiderio, no oeste baiano. A região é considerada de alto potencial espeleológico devido ao contexto geológico, de substrato formado por rochas metacalcáreas neoproterozóicas do Grupo Bambuí, subjacentes aos arenitos cretáceos do Grupo Urucuia. Para testar a hipótese utilizaram-se métodos geofísicos de prospecção e análises geotécnicas, que serviram para caracterização preliminar da questão, a qual deverão seguir-se de estudos adicionais mais detalhados como mapeamentos geotécnicos das cavidades e seu entorno, determinação precisa de tipos litológicos, sua distribuição e anisotropias, comportamento geomecânico do sistema, estado de alteração do maciço, tipo e frequência de fraturamento. Também foram considerados processos de acompanhamento dos efeitos provocados pela construção e operação da rodovia, estabelecendo-se, assim, uma espécie de rotina de monitoramento de parâmetros de controle. As informações obtidas neste estudo podem servir como medidas complementares às normas construtivas já existentes e auxiliar na tomada de decisões quanto aos processos e estudos exigidos durante o licenciamento ambiental de obras rodoviárias para a correta ocupação do solo e proteção do patrimônio espeleológico.

Palavras-chave: patrimônio geológico, geoconservação, área de proteção estrutural

ABSTRACT

Before the construction of roads in regions with the potential for occurring underground natural cavities, it is necessary to prospect, identify and characterize the degree of relevance of the caves found, in order to then assess the risks of impacts to the speleological heritage and its respective area of influence. Brazilian law establishes that studies to determine the area of influence must be carried out and in the absence of these, a distance of 250 m to this area is assumed, starting from the contour in a convex surface projection. There is still debate about the adoption of an objective method to determine the structural safety limit of the cavities impacted by the construction of highways, as well as the validity of establishing a standard distance that ensures this safety. The research started from the hypothesis that it would be possible to determine a structural safety zone for the possible impacts caused by the implantation of a highway in an area composed of carbonate karst systems. The case study was carried out in an unpaved segment of the BR-135 / BA highway, in the municipality of São Desiderio, in western Bahia. The region is considered of high speleological potential due to the geological context, of a substrate formed by neoproterozoic metacalcarea rocks of the Bambuí Group, underlying the cretaceous sandstones of the Urucuia Group. To test the hypothesis, geophysical methods of prospecting and geotechnical analyzes were used, which served for preliminary characterization of the question, which should be followed by additional more detailed studies such as geotechnical mapping of the cavities and their surroundings, precise determination of lithological types, their distribution and anisotropies, geomechanical behavior of the system, state of alteration of the massif, type and frequency of billing. Processes for monitoring the effects caused by the construction and operation of the highway were also considered, thus establishing a kind of routine for monitoring control parameters. The information obtained in this study can serve as complementary measures to the already existing construction standards and assist in making decisions regarding the processes and studies required during the environmental licensing of road works for the correct occupation of the soil and protection of the speleological heritage.

Keywords: geological heritage, geoconservation, structural protection area.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
FIGURA 1.2 – PLATAFORMA DE LANÇAMENTO E VANT – <i>SMARTBIRD X-260</i> . 28	28
FIGURA 1.3 – CÂMERA DIGITAL <i>SONY NEX-C3</i>	29
FIGURA 1.4 – PLANEJAMENTO DE VOO.	30
FIGURA 1.5 – IMAGEM DE DOLINA ONDE ENCONTRA-SE A ENTRADA DE UMA CAVERNA.....	32
FIGURA 1.6 – AJUSTAMENTO DAS IMAGENS, AEROTRIANGULAÇÃO DA ÁREA DA CAVERNA SUCUPIRA.	32
FIGURA 1.7 – MOSAICO ORTORRETIFICADO DA ÁREA CORRESPONDENTE A PASSAGEM DA BR-135/BA SOBRE O SISTEMA CARSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES E A CAVIDADE DO BURACO DO INFERNO.....	33
FIGURA 1.8 – PREPARO DE PONTO DE APOIO E QUIPAMENTO.	34
FIGURA 1.9 – MARCAS DE PRÉ-SINALIZAÇÃO DE PONTOS DE APOIO NO TERRENO.....	35
FIGURA 1.10 – OBTENÇÃO DE DADOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL NA ÁREA DE ESTUDO.	36
FIGURA 1.11 – OBTENÇÃO DE DADOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL NO INTERIOR DA CAVERNA BURACO DO INFERNO.	37
FIGURA 1.12 – CHAVE DE CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE RELEVÂNCIA DE CAVIDADES NATURAIS SUBTERRÂNEAS UTILIZADA.....	38
FIGURA 1.13 - PRINCÍPIOS DO FUNCIONAMENTO DO MÉTODO GPR E SUAS APLICAÇÕES	42
FIGURA 1.14 – ILUSTRAÇÃO DA TÉCNICA DE TRANSILUMINAÇÃO	43
FIGURA 1.15 - ILUSTRAÇÃO DA TÉCNICA <i>COMMON MIDPOINT</i>	44
FIGURA 1.16 – REPRESENTAÇÃO DA TÉCNICA <i>COMMON OFFSET</i>	45
FIGURA 1.17 – GPR. A) EQUIPAMENTO UTILIZADO; B) CAMINHAMENTO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO	45
FIGURA 1.18 – LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS E DE POSSÍVEIS CAVIDADES, INTERPRETADAS COMO PEQUENOS CANAIS DE DISSOLUÇÃO	47

FIGURA 1.19 - LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS GRAVIMÉTRICOS EXECUTADOS NA ÁREA DE ESTUDO	48
FIGURA 1.20 - BASE DE REFERÊNCIA PARA O VALOR DE GRAVIDADE NA ÁREA DE ESTUDO	49
FIGURA 1.21 – GRAVÍMETRO DIGITAL CG-5, SCINTREX, COM GPS L1/L2.....	50
FIGURA 1.22 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS LOCAIS DE ENSAIOS GEOFÍSICOS NA BR-135/BA.....	53
FIGURA 1.23 – FUNCIONAMENTO DO MÉTODO ELÉTRICO DE PROSPECÇÃO	53
FIGURA 1.24 – DISTRIBUIÇÃO DE ÍONS E PARTÍCULAS SEDIMENTARES ELETRICAMENTE CARREGADAS NUM AMBIENTE NATURAL	56
FIGURA 1.25 – PROCEDIMENTO DE PERFILAGEM IP	57
FIGURA 1.26 – REPRESENTAÇÃO DE UMA PSEUDOSEÇÃO DE MEDIDAS DE UM CAMINHAMENTO ELÉTRICO INDICANDO A POSIÇÃO RELATIVA DE ZONAS QUE PRODUZEM POTENCIAIS INDUZIDOS	58
FIGURA 1.27 – EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES. A) SISTEMA TRANSMISSOR <i>VIP3000W</i> ; B) TRANSMISSOR E BOBINAS CORRENTE; D) GERADOR <i>EM5000S</i> ; E) SISTEMA RECEPTOR DE MARCA ELRECPRO	59
FIGURA 1.28 – LOCALIZAÇÃO DAS PEDREIRAS EM RELAÇÃO A INTERSEÇÃO DO BURACO DO INFERNO COM A BR-135/BA	62
FIGURA 1.29 – INSTALAÇÃO DOS GEOFONES	63
FIGURA 1.30 – IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DE MONITORAMENTO	64
FIGURA 1.31 – FONTE DE VIBRAÇÃO: A) VEÍCULO LEVE (CARRO DE PASSEIO); B) VEÍCULO MÉDIO (UTILITÁRIO/CAMINHONETE); C) VEÍCULO PESADO (CAMINHÃO).....	65
FIGURA 1.32 – TIPOS DE REGISTROS DE CAPTAÇÃO DO GEOFONE	68
FIGURA 1.33 – ROLO COMPACTADOR DE PNEUS MODELO CW34.....	75
FIGURA 1.34 – ESQUEMA DE CARREGAMENTO NA RODOVIA: TENSÃO PROVENIENTE DO ATERRO (QUE JÁ INCLUI PAVIMENTAÇÃO) E DO EQUIPAMENTO DE COMPACTAÇÃO.	76
FIGURA 2.1 - CONTEXTO GEOLÓGICO DO TRECHO RODOVIÁRIO, SOBRE ROCHAS METACALCÁRIAS DO GRUPO BAMBUÍ E ARENITOS DO GRUPO URUCUIA.....	78

FIGURA 2.2 – DOBRAS EM ROCHAS DA FM. SÃO DESIDÉRIO, NO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO (A) E FM. SERRA DA MAMONA, NO MUNICÍPIO DE CATOLÂNDIA (B), EXEMPLOS DE DEFORMAÇÕES TECTÔNICAS DO DOMÍNIO PERICRATÔNICO.	79
FIGURA 2.3 – ASPECTOS COMUNS DA FM. SÃO DESIDÉRIO A) MORRO COM FEIÇÕES CÁRSTICAS; B) FEIÇÕES DENOMINADAS CAMPO DE LAPIÁS. LOCAL: RODOVIA BR 135/BA NAS IMEDIAÇÕES DO KM 207.	80
FIGURA 2.4 – APARÊNCIA DOS METACALCÁRIOS OOLÍTICOS DA FM. SÃO DESIDÉRIO. A) LAMINAÇÃO FREQUENTEMENTE OBSERVADA EM ESCALA DE AFLORAMENTO; B) COMPOSIÇÃO OOLÍTICA DO ARCABOUÇO E CIMENTAÇÃO DE CALCITA ESPÁTICA, ENTRE OS GRÃOS (FOTOMICROGRAFIA, POL.CRUZADOS. LOCAL: BR-135/BA EM SÃO DESIDÉRIO.	81
FIGURA 2.5 – CONTATO ENTRE OS GRUPOS URUCUIA (TOPO) E BAMBUI, MAL EXPOSTO, COM AMOSTRAS DE ROCHAS FRECAS DAS UNIDADES. LOCAL: KM 210, BR-135/BA.	82
FIGURA 2.6 – SEÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO ENTRE OS GRUPOS URUCUIA E BAMBUI.	83
FIGURA 2.7 – ESTRUTURAÇÃO TECTÔNICA REGIONAL, COM INDICAÇÃO DOS LOCAIS (PONTOS) DE COLETA DE DADOS DE CAMPO, DIAGRAMAS DE DIREÇÕES DE LINEAMENTOS E ATITUDES DE FRATURAS.	86
FIGURA 2.8 – ESTEREOGRAMAS DAS ATITUDES DE ESTRUTURAS RÚPTEIS (FRATURAS E JUNTAS) MAPEADAS NA REGIÃO.	87
FIGURA 2.9 – REDE HIDROGRÁFICA E A ÁREA DE ESTUDO	94
FIGURA 2.10 – CAPTAÇÃO E BOMBEAMENTO DE ÁGUA BRUTA DO RIO GRANDE (LAT.: 8.637.415 M S / LONG.: 497.825 M; FUSO 23L)....	95
FIGURA 2.11 – CAPTAÇÃO E ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA (EEAB) DO RIO SÃO DESIDÉRIO (LAT.: 8.632.931 M S / LONG.: 502.959 M; FUSO 23L).....	95
FIGURA 2.12 – POÇOS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA E OUTORGAS DE USOS MÚLTIPLOS.....	97

FIGURA 2.13 – MAPA DE PROFUNDIDADES ESTIMADAS DO NÍVEL ESTÁTICO DO AQUÍFERO FREÁTICO	99
FIGURA 2.14 – SISTEMAS AQUÍFEROS DA ÁREA DE ESTUDOS	102
FIGURA 2.15 – PRINCIPAIS FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS/GEOLÓGICAS DO RELEVO CÁRSTICO	104
FIGURA 2.16 – BURACO DA SUCUPIRA, EXEMPLO DE DOLINA DE ABATIMENTO, DO SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES.	105
FIGURA 2.17 - LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA CÁRSTICO JOÃO RODRIGUES E A RODOVIA BR-135/BA E UMA SEÇÃO LONGITUDINAL REGIONAL DA ÁREA.	107
FIGURA 2.18 – PARQUE MUNICIPAL DA LAGOA AZUL: A) MIRANTE CÂNION DO CATÃO; B) MIRANTE LAGOA AZUL.....	108
FIGURA 2.19 – GRUTA DO CATÃO: A) VISTA A PARTIR DA ENTRADA; B) ESPELEOTEMAS	109
FIGURA 2.20 – VISTA DE PARTE DO PAREDÃO DA DOLINA BURACO DA SUCUPIRA.....	109
FIGURA 2.21 – SUMIDOURO DO JOÃO BAIO: A) VISTA DA BASE; B) RIO JOÃO RODRIGUES	110
FIGURA 2.22 – A) VISTA DA BASE DA DOLINA DE ACESSO A CAVIDADE DO BURACO DO INFERNO; B) POÇO DO SURUBIM	110
FIGURA 2.23 – CAVIDADES CADASTRADAS E PROSPECTADAS EM DISTÂNCIA DE 250 M DE CADA LADO DO TRAÇADO DA RODOVIA (KM 207 AO 226).....	113
FIGURA 2.24– MAPA TOPOGRÁFICO DA CAVIDADE BURACO DO INFERNO DA LAGOA DO CEMITÉRIO	114
FIGURA 2.25 – IMAGEM DO CRUZAMENTO DO BURACO DO INFERNO COM O LEITO ATUAL DA RODOVIA.....	116
FIGURA 2.26 – ATRIBUTOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE GRAU DE RELEVÂNCIA MÁXIMA DO BURACO DO INFERNO: A) ESPELEOTEMA; B) <i>GABUNILLO SP.</i> - ESPÉCIE TROGLÓBIA RARA	117
FIGURA 2.27 – SALÃO INTERIOR DA CAVERNA DO BURACO DO INFERNO...	117
FIGURA 2.28 – ESPELEOTEMAS NO INTERIOR DA CAVERNA DO BURACO DO INFERNO.....	118

FIGURA 2.29 – ESPELEOTEMAS NO INTERIOR DA CAVERNA DO BURACO DO INFERNO.....	118
FIGURA 4.1 – MAPA DE ANOMALIAS DE <i>BOUGUER</i> COM DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES LITOLÓGICAS.....	130
FIGURA 4.2 – MAPA DE ANOMALIAS RESIDUAIS DE SEGUNDO GRAU INDICANDO AS FEIÇÕES CÁRSTICAS DO SUBSTRATO ROCHOSO.....	131
FIGURA 4.3 – PERFIS GRAVIMÉTRICOS OBTIDOS POR MODELAGEM DAS ANOMALIAS RESIDUAIS DE SEGUNDA ORDEM: A) RESULTADO DA ANOMALIA RESIDUAL DE SEGUNDO GRAU; B) PERFIL GRAVIMÉTRICO INDICANDO CAVIDADES PROFUNDAS	132
FIGURA 4.4 – MODELO DE PROFUNDIDADE DA CARGABILIDADE REAL (PAINEL SUPERIOR) E DA RESISTIVIDADE REAL (PAINEL INFERIOR) DA LINHA L1	136
FIGURA 4.5 – MODELO DE PROFUNDIDADE DA CARGABILIDADE REAL (PAINEL SUPERIOR) E DA RESISTIVIDADE REAL (PAINEL INFERIOR) DA LINHA L2	137
FIGURA 4.6 – MODELO DE PROFUNDIDADE DA CARGABILIDADE REAL (PAINEL SUPERIOR) E DA RESISTIVIDADE REAL (PAINEL INFERIOR) DA LINHA L3	138
FIGURA 4.7 – MODELO DE PROFUNDIDADE DA CARGABILIDADE REAL (PAINEL SUPERIOR) E DA RESISTIVIDADE REAL (PAINEL INFERIOR) DA LINHA L4	139
FIGURA 4.8 – MAPA DE ISORRESISTIVIDADE. A) NÍVEL N1 SUPERFICIAL; B) NÍVEL N2, PROFUNDIDADE DE 17 m.....	155
FIGURA 4.9 – MAPA DE ISORRESISTIVIDADE: A) NÍVEL N3, PROFUNDIDADE DE 37 m; B) NÍVEL N4, PROFUNDIDADE DE 64 m	156
FIGURA 4.10 – MAPA DE ISORRESISTIVIDADE: A) NÍVEL N5, PROFUNDIDADE DE 96 m; B) NÍVEL N6, PROFUNDIDADE DE 137 m	157
FIGURA 4.11 – MAPA DE ISORRESISTIVIDADE DO NÍVEL N7, PROFUNDIDADE DE 188 m	158
FIGURA 4.12 – PROJEÇÃO DA CAVERNA BURACO DO INFERNO, OBTIDA PELO MÉTODO DE VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE REAL	159

FIGURA 4.13 – MODELO 3D DA CAVERNA DO BURACO DO INFERN, PROVENIENTE DA INTERPRETAÇÃO DE DADOS DOS LEVANTAMENTOS DA ELETRORRESISTIVIDADE.	160
FIGURA 4.14 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P01 (INTERIOR DA CAVIDADE DO BURACO DO INFERNO)	164
FIGURA 4.15 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P02 (INTERIOR DA CAVIDADE DO BURACO DO INFERNO)	164
FIGURA 4.16 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P03 (2 m DA RODOVIA)	165
FIGURA 4.17 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P04 (50 m DA RODOVIA)	166
FIGURA 4.18 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P05 (150 m DA RODOVIA)	166
FIGURA 4.19 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P06 (250 m DA RODOVIA)	167
FIGURA 4.20 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P07 (2 m METROS DA RODOVIA).....	168
FIGURA 4.21 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P08 (50 m DA RODOVIA)	168
FIGURA 4.22 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P09 (100 m DA RODOVIA)	169
FIGURA 4.23 – METACALCÁRIO OOLÍTICO DO GRUPO BAMBUÍ. ARACABOUÇO CONSTITUIDO POR OÓIDES E PISÓIDES, COM ESPAÇOS INTERGRANULARES PREENCHIDOS POR CIMENTO ESPÁTICO FOTOMICROGRAFIA COM POLARIZADORES CRUZADOS OU DESRUZADOS.	170
FIGURA 4.24 – CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NA ANÁLISE DE DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL.	171
FIGURA 4.25 – CORPOS DE PROVA POSICIONADOS NO APARELHO DE ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	171

FIGURA 4.26 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES SOBRE A RODOVIA (MÉTODO DE WINKLER, 1867).....	176
FIGURA 4.27 – REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES SOBRE A RODOVIA.....	176
FIGURA 4.28 – VARIAÇÃO CALCULADA DE TENSÕES SOBRE NO MACIÇO E CAVIDADE CONSIDERANDO-SE A APLICAÇÃO DA SOMA DAS CARGAS DO MAIOR EQUIPAMENTO CONSTRUTIVO, PAVIMENTO E ATERRO.....	180
FIGURA 5.1 - CAVIDADES PROSPECTADAS PELO ITTI/UFPR ENTRE OS KM 207 E 226.....	183
Fonte: ITTI (2014)FIGURA 5.2 - CAVIDADES CADASTRADAS ENTRE OS KM 207 E 226 DA BR-135/BA.....	183
FIGURA 5.3 – LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO	186
FIGURA 5.4 – ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO	189
FIGURA 6.1 - MEDIDAS DE RESGUARDO AO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO NA FASE DE PLANEJAMENTO DE OBRAS.....	195
FIGURA 6.2 - MEDIDAS MITIGADORAS PARA O RESGUARDO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO DURANTE A FASE DE CONSTRUÇÃO DE RODOVIA.....	199

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO.....	88
QUADRO 2.2 – POÇOS EXISTENTES NA REGIÃO.....	98
QUADRO 2.3 - OUTORGAS DE USOS MÚLTIPLOS DE ÁGUA.....	100
QUADRO 2.4 – CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DO AQUÍFERO.....	101
QUADRO 4.1 - VALORES DE COEFICIENTE DE SEGURANÇA (F.S.) DE RUPTURA E PROFUNDIDADE CARGA APLICADA (Q) NA SUPERFÍCIE DE 5,0 TF/m ² (50 KPA) NA VERTICAL SOBRE A CAVERNA.....	178
QUADRO 6.1 - MEDIDAS DE RESGUARDO AO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO NA FASE DE PLANEJAMENTO DE OBRAS.....	192
QUADRO 6.2 – ETAPAS RELATIVAS AOS PROJETOS RODOVIÁRIOS DE ACORDO COM AS DIRETRIZES BÁSICAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS RODOVIÁRIOS (2006).....	193
QUADRO 6.3 - MEDIDAS DE RESGUARDO AO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO NA FASE DE PLANEJAMENTO DE OBRAS.....	196
QUADRO 6.4 - MEDIDAS MITIGADORAS PARA O RESGUARDO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO DURANTE A FASE DE CONSTRUÇÃO DE RODOVIA.	200
QUADRO 6.5 – MEDIDAS DE MONITORAMENTO NAS FASES DE PRÉ-OPERAÇÃO E OPERAÇÃO ASSISTIDA.	204

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS – SISTEMA <i>SMARTHBIRD</i> X-260.	28
TABELA 1.2 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – <i>SONY</i> , MODELO <i>NEX-C3</i>	29
TABELA 1.3 – CLASSIFICAÇÃO DE IMPORTÂNCIA RELATIVA AOS ATRIBUTOS DA CAVIDADE NATURAL SUBTERRÂNEA AVALIADOS SOB OS ENFOQUES LOCAL E REGIONAL	39
TABELA 1.4 – RESULTADOS DO CÁLCULO DE PERCENTIL PARA O ROL DE DADOS CONSIDERADOS REGIONAL E LOCALMENTE	40
TABELA 1.5 – LOCALIZAÇÃO DOS LOCAIS MONITORADOS.....	63
TABELA 1.6 – VELOCIDADES MEDIDAS PARA ANAÁLISE DE EFEITO DAS VIBRAÇÕES CAUSADAS POR TRÁFEGO DE VEÍCULOS.....	65
TABELA 1.7 – VELOCIDADES MEDIDAS PARA ANAÁLISE DE EFEITO DAS VIBRAÇÕES CAUSADAS POR TRÁFEGO DE VEÍCULOS (continuação).....	66
TABELA 1.8 – VELOCIDADES MEDIDAS PARA ANÁLISE DE EFEITO DAS VIBRAÇÕES CAUSADAS POR TRÁFEGO DE VEÍCULOS (conclusão).....	67
TABELA 1.9 – MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) E COEFICIENTE DE <i>POISSON</i>	69
TABELA 1.10 – VALORES DE ÍNDICES DE VAZIOS, TEOR DE UMIDADE E PESO ESPECÍFICO SECO DE SOLOS TÍPIDO EM ESTADO NATURAL. .	74
TABELA 2.1 - DOMICÍLIOS E TIPO DE ABASTECIMENTO NA SEDE DO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO	96
TABELA 2.2 – CAVERNAS LOCALIZADAS NA ÁREA DE PROSPECÇÃO	111
TABELA 4.1 – DIMENSÕES DA CAVERNA BURACO DO INFERNO OBTIDOS PELO MÉTODO GEOFÍSICO DE POLARIZAÇÃO INVERTIDA E RESISTIVIDADE.....	159
TABELA 4.2 – RESULTADOS DE MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO	163
TABELA 4.3 – VALORE DE COEFICIENTE DE <i>POISSON</i> E DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) DAS AMOSTRAS DE METACALCÁRIOS E SEUS VALORES MÁXIMO, MÉDIO E MÍNIMO.	172

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABIO	Autorização de Captura, Coleta e Transporte de Material Biológico
ADA	Área Diretamente Afetada
AID	Área de Influência Direta
APHZ	Área da Projeção de Caverna
Buraco do Inferno	Caverna Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério
CANIE	Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas
CECAV	Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
CNC	Cadastro Nacional de Cavernas do Brasil
CNSA-IPHAN	Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos do IPHAN
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
ITTI	Instituto Tecnológico de Transporte e Infraestrutura
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PARNACP	Parque Nacional Cavernas do Peruaçu
PBA	Plano Básico Ambiental
PHZ	Projeção Horizontal
PME	Plano de Manejo Espeleológico
SBE	Sociedade Brasileira de Espeleologia
SCRJR	Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues
SEMA	Secretaria do Meio Ambiente
UC	Unidade de Conservação
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	World Geodetic System

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OJETIVOS.....	23
1.1.1 Objetivos específicos.....	23
1.2 ESTRUTURAÇÃO DO DOCUMENTO	24
1.3 ÁREA DE ESTUDO	26
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
1.4.1 Cartografia por Imageamento.....	27
1.4.2 Estudos geomorfológicos mediante imageamento aéreo.....	27
1.4.3 Definições dos parâmetros de voo	31
1.4.4 Recobrimento aerofotográfico	31
1.4.5 Processamento do mosaico digital.....	32
1.4.6 Apoio do Sistema Global de Navegação por Satélite.....	33
1.4.7 Pré-sinalização de pontos de apoio	34
1.5 ANÁLISE DA GEOLOGIA ESTRUTURAL.....	36
1.6 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ESPELEOLÓGICO	37
1.7 DETERMINAÇÃO DO GRAU DE RELEVÂNCIA DAS CAVIDADES	38
1.8 MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA DETECÇÃO DAS CAVIDADES SOB O EIXO DA RODOVIA.....	41
1.8.1 Método geofísico com uso de <i>Ground Penetrating Radar</i> - GPR.....	41
1.8.1.1 Profundidade de penetração	43
1.8.1.2 Técnicas de aquisição	43
1.8.1.3 Aquisição e processamento dos dados	45
1.8.2 Método geofísico gravimétrico.....	47
1.8.2.1 Aquisição dos dados.....	49
1.8.2.2 Processamento dos dados	50
1.8.2.3 Processamento Secundário – Anomalia <i>Bouguer</i> - Δg_B	51
1.8.2.4 Geração dos perfis	52
1.8.2.5 Separação regional-residual.....	52
1.8.3 Método resistividade e polarização induzida	52
1.8.3.1 Polarização Induzida	54
1.8.3.2 Arranjo Dipolo-Dipolo.....	56
1.8.3.3 Método de Inversão	58

1.8.3.4 Aquisição, processamento e interpretação dos dados	59
1.9 DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS	60
1.9.1 Aquisição dos dados	62
1.10 LEVANTAMENTO POR SONDAGENS E ENSAIOS	69
1.10.1 Análises geotécnicas.....	70
1.10.2 Método para avaliação de tensões em cavidades (túneis).....	71
1.10.3 Cálculo da capacidade de suporte do solo com uso de <i>software</i>	72
1.10.4 Distribuição de tensões na rodovia sobre a caverna Buraco do Inferno	74
2 CONTEXTO GEOLÓGICO	77
2.1 BACIA DO SÃO FRANCISCO.....	78
2.2 BACIA SANFRANCISCANA.....	81
2.2.1 Grupo Bambuí	82
2.3 COBERTURAS FANEROZÓICAS DA BACIA SANFRANCISCANA.....	83
2.3.1 Grupo Urucuia	84
2.4 ESTRUTURAÇÃO REGIONAL	85
2.5 CONTEXTO E CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA	88
2.6 HIDROLOGIA.....	90
2.6.1 Região fisiográfica do médio São Francisco	90
2.6.2 Bacia do Alto Rio Grande	92
2.6.3 Bacia do rio São Desidério	93
2.7 HIDROGEOLOGIA.....	100
2.8 ESTUDO GEOLÓGICO DO SISTEMA CÁRSTICO	103
2.9 POTENCIAL E CARACTERIZAÇÃO ESPELEOLÓGICA.....	111
2.9.1 BURACO DO INFERNO DA LAGOA DO CEMITÉRIO	114
3 EMBASAMENTO TEÓRICO.....	119
3.1 GEOCONSERVAÇÃO.....	119
3.2 ELEMENTOS DE PROTEÇÃO DO PATRIMÔNIO GEOLÓGICO	122
3.3 CAVERNAS E A LEGISLAÇÃO DE PROTEÇÃO NO BRASIL	124
3.4 NECESSIDADE DE DEFINIÇÃO DE UMA ÁREA DE SEGURANÇA ESTRUTURAL	127
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	130
4.1 RESULTADOS USO MÉTODO GRAVIMÉTRICO	130
4.2 RESULTADOS DO USO DO MÉTODO GPR	133

4.3 RESULTADOS DO USO DO MÉTODO POLARIZAÇÃO INDUZIDA E RESISTIVIDADE	134
4.4 DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS	162
4.5 ANÁLISE PETROGRÁFICA	170
4.6 ANÁLISE COEFICIENTE DE POISSON E MÓDULOS DE ELASTICIDADE....	170
4.7 RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES GEOTÉCNICAS	172
4.7.1 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES.....	175
5 ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE	182
5.1 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO	185
5.2 ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE	187
6 PROPOSTAS DE CONSERVAÇÃO DE CAVIDADES NATURAIS EM ÁREAS CÁRSTICAS SOB RISCOS DE IMPACTOS PROVENIENTES DA CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS.....	190
6.1 MEDIDAS PARA O RESGUARDO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO DURANTE A FASE PLANEJAMENTO DA RODOVIA	191
6.2 MEDIDAS MITIGADORAS PARA O RESGUARDO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO DURANTE A FASE DE CONSTRUÇÃO DE RODOVIA.....	198
6.3 MEDIDAS DE MONITORAMENTO NAS FASES DE PRÉ-OPERAÇÃO E OPERAÇÃO ASSISTIDA	204
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	205
REFERÊNCIAS.....	207

1 INTRODUÇÃO

Antes da construção de estradas em regiões com potencial de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas, é necessário realizar a prospecção, a identificação e a caracterização do grau de relevância de cada cavidade encontrada, para então, avaliar os possíveis riscos de impactos ao patrimônio espeleológico e sua respectiva área de influência durante a instalação e operação do empreendimento.

A legislação brasileira estabelece que estudos para determinar a área de influência devem ser realizados, na ausência destes estudos assume-se uma distância de 250 metros à esta área de influência, a partir do contorno em projeção convexa superficial. No meio técnico, atualmente ainda se discute sobre um método objetivo para determinar o limite de segurança estrutural das cavidades impactadas pela construção e operação de rodovias, bem como sobre a validade do estabelecimento de uma distância padrão que garanta tal segurança.

O desenvolvimento da pesquisa partiu da hipótese de que seria possível estabelecer, com maior precisão do que os limites estabelecidos na legislação, uma zona de segurança estrutural para os possíveis impactos decorrentes da implantação e operação de uma rodovia em área com presença de sistemas cársticos carbonáticos. Para testar este pressuposto, foram realizados estudos em segmento não pavimentado da rodovia BR-135/BA, no município de São Desidério, no oeste baiano, onde cruza o sistema cárstico.

O tema integra um conjunto de projetos de pesquisa vinculados à linha de pesquisa de Geoconservação e patrimônio geológico do PPGEOL/UFPR e do Grupo de pesquisa do CNPq/UFPR em Geoconservação e patrimônio geológico.

Os estudos foram realizados com a estrutura técnica e financeira proporcionada pelo termo de cooperação nº 1103/2013-DPP, entre o Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura, órgão vinculado ao Departamento de Transportes da Universidade Federal do Paraná, com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

O termo de cooperação tem como objetivo a elaboração de estudo de alternativas locais, anteprojeto de engenharia, estudos ambientais, execução de gestão ambiental, abrangendo a supervisão e o gerenciamento ambiental, bem como, a implantação de programas ambientais, visando à regularização ambiental da rodovia federal BR-135/BA/MG, no trecho correspondente ao município de

Barreiras, no estado da Bahia, até o município de Itacarambi, em Minas Gerais, com extensão total de 424,3 km.

A região é considerada de alto potencial espeleológico devido ao contexto geológico cárstico composto por rochas metacalcáreas neoproterozóicas do Grupo Bambuí, subjacentes aos arenitos cretáceos do Grupo Urucuaia.

Utilizando a combinação de métodos investigativos geofísicos, indiretos e/ou não destrutíveis, foi possível estimar a posição, as características geométricas, as dimensões e a profundidade das cavidades em relação a superfície do terreno, possibilitando a elaboração de mapas e perfis sob o eixo da rodovia projetada. Observou-se então, que o traçado da rodovia cruza, em superfície, com o Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues, interceptando a caverna denominada Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério, considerada de máxima relevância, localizada a uma profundidade aproximada de 80 m.

Com o objetivo de estimar a segurança estrutural desta cavidade e reduzir as probabilidades de ocorrência dos modos de ruptura das rochas, foram aplicadas análises geotécnicas, incluindo simulações da instalação de rodovia, que permitiram calcular a distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas ao maciço rochoso, semelhantes às utilizadas para a determinação dos riscos de ruptura em obras de abertura de túneis. Os resultados indicaram que é possível determinar as distâncias para a proteção estrutural de cavidades.

É frequente a sobreposição de interesses entre as atividades econômicas e a conservação do patrimônio natural como, neste caso, o espeleológico. Dentro do conjunto do patrimônio natural, o patrimônio geológico apresenta grande vulnerabilidade, porque constitui a base sobre a qual se desenvolvem as atividades humanas (Vieira e Cunha, 2014). Esforços têm sido empregados para a sua proteção, entre elas, ações empreendidas no sentido de conservação e gestão deste patrimônio geológico e dos processos naturais a ele associados.

Em muitas dessas situações, em estudos de viabilidade do empreendimento, torna-se necessário uma avaliação prévia, que pode vir a ser determinante tanto para o destino final da caverna quanto para o futuro do empreendimento. Obras que necessariamente venham a trazer impactos de grande magnitude ao acervo espeleológico podem vir a ter alterações de traçados e/ou apresentar alternativas tecnológicas para garantir a conservação de determinada cavidade relevante. Malagutti e Cottas (1993) destacam o avanço tecnológico e aperfeiçoamento das

metodologias das ciências geológicas como base para melhorar a compreensão das composições do meio físico para satisfazer as diferentes necessidades impostas pelo homem.

Após a autorização do órgão ambiental para iniciar as obras de construção das estradas, cuidados especiais devem ser obrigatoriamente adotados, monitorados e fiscalizados com o objetivo de resguardar a integridade do patrimônio espeleológico, buscando manter as condições de conservação das cavernas e de suas áreas de segurança estrutural.

Nesse sentido, foram caracterizados processos que visam minimizar os impactos sobre o sistema de cavernas, com acompanhamento dos efeitos provocados pela construção e operação da rodovia, estabelecendo-se, assim, uma espécie de protocolo ou rotina de monitoramento de parâmetros, fundamental para se aferir a efetividade das estratégias de proteção.

Os resultados deste estudo de caso devem contribuir para complementar as normas vigentes de construção de estradas e na tomada de decisões dos órgãos ambientais em processos de licenciamento ambiental com conflito entre a proteção do patrimônio espeleológico e a necessidade de construção de obras rodoviárias.

1.1 OBJETIVOS

Estabelecer critérios, os mais objetivos possíveis, de avaliação da vulnerabilidade estrutural da área de influência de patrimônio espeleológico localizada em sistemas cársticos carbonáticos, na construção de estradas.

1.1.1 Objetivos específicos

O objetivo principal foi buscado mediante o desenvolvimento de objetivos específicos:

- Aplicação e avaliação da eficiência de diferentes técnicas de investigação por diferentes métodos geofísicos, não destrutíveis, para detecção e delimitação de cavidades cársticas;
- Aplicação de métodos para a avaliação preliminar de tensões e deformações em maciços rochosos com cavidades naturais, destacando as que permitiram a análise das condições de equilíbrio no estado limite

(ou ruptura), durante fase de planejamento das obras, como medida preventiva de proteção das cavernas;

- Obtenção de respostas que possibilitem adequada compreensão dos efeitos da instalação e operação dos empreendimentos rodoviários, de modo a conservar as cavidades naturais de acordo com o uso futuro do território;
- Proposição de métodos investigativos conjugados, para um diagnóstico mais seguro na fase preliminar de projeto, através de estudos sistemáticos ao redor e no interior de cavidades afetadas pela construção de obras de infraestrutura rodoviária.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento foi estruturado de forma a apresentar os resultados dos estudos realizados na avaliação dos riscos de impactos estruturais sobre o patrimônio espeleológico, decorrentes da construção de estradas, em áreas cársticas onde se detectam cavidades subterrâneas.

A legislação ambiental determina que antes da construção de estradas em áreas com potencial ocorrência de cavidades subterrâneas é necessário realizar a avaliação dos riscos de impactos da instalação do empreendimento sobre o patrimônio espeleológico. Torna-se necessário, antes da construção, uma fase de planejamento envolvendo a prospecção espeleológica, a identificação e a caracterização, para melhor delimitar as respectivas áreas de influência das cavernas.

De acordo com o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, a área de influência não deve ser entendida como um espaço territorial onde os impactos não são permitidos. Para definição de área de influência os estudos espeleológicos deverão ser integrados aos estudos de impacto ambiental do empreendimento, devendo ser analisada a relação de conflito entre os impactos do empreendimento e o patrimônio espeleológico (CECAV, 2013).

A pesquisa realizada integrou vários métodos analíticos, visando estabelecer uma área de segurança estrutural ao redor de cavidades de origem carbonática, quando em conflito com a instalação de estradas.

Os trabalhos iniciaram com uma fase de caracterização geológica e geomorfológica da área de estudo. Com base no mapa de potencialidade de ocorrência de cavidades elaborado, foi realizada a prospecção espeleológica, em 250 m de distância do eixo da rodovia, para posterior determinação do grau de relevância das cavidades identificadas dentro deste perímetro. Constatou-se que a BR-135/BA atravessa perpendicularmente o Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues, onde se encontra a caverna do Buraco do Inferno, classificada como de máxima relevância.

Foram então realizados levantamentos geofísicos não destrutivos para identificação mais precisa e melhor definição das feições e estruturas do substrato, tais como, vazios subterrâneos criados pela dissolução das rochas carbonáticas (NASCIMENTO NETO *et al.*, *no prelo*). Combinaram-se os resultados dos métodos investigativos geofísicos com análises geotécnicas da cavidade natural sob o eixo da rodovia, bem como, a continuidade dos serviços construtivos de superestrutura e sua futura operação.

São apresentadas sugestões de ações que podem contribuir para a conservação de cavidades se adotados nas etapas de planejamento, implantação e operação de rodovias, que podem ser utilizadas em projetos semelhantes de infraestrutura de obras lineares.

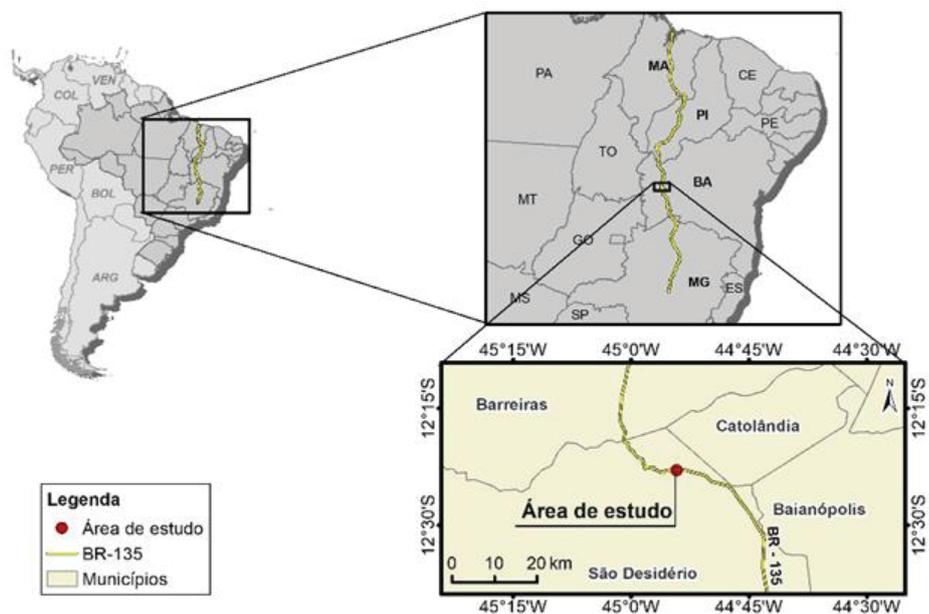
Seguindo as normas do Programa de pós-graduação em Geologia da UFPR, é necessário apresentar esta tese e dois artigos científicos relacionados com o tema de pesquisa. O primeiro artigo, Nascimento Neto. D; Fernandes. L. A; Ratton. E., com o título: Uso combinado de métodos geofísicos para caracterização de patrimônio espeleológico sob rodovia em terreno de rochas carbonáticas (*no prelo*), aceito para publicação no Anuário IGeo da UFRJ/CCMN, ISSN 0101-9759, e-ISSN 1982-3908, e o segundo, Nascimento Neto. D; Fernandes. L. A; Ratton. E.; Luz. C.C., com o título: Caracterização de patrimônio espeleológico e avaliação de área de proteção estrutural em rochas carbonáticas por uso combinado de métodos geofísicos e geotécnicos, aceito para publicação na edição da Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais (RICA V12 N04 2021).

1.3 ÁREA DE ESTUDO

Os estudos e experimentos foram realizados no município de São Desidério, na região oeste do estado da Bahia (FIGURA 1.1), aproveitando-se a realização de obras de construção, em trecho não pavimentado, entre os km 207 e 226, da rodovia BR-135/BA. Este segmento rodoviário passa por terreno cárstico que apresenta um conjunto de formas típicas, tais como cavernas, dolinas, lapiás, vales cegos e sumidouros.

A BR-135 é uma rodovia longitudinal pertencente ao Plano Rodoviário Federal de 1973, com extensão total de 2.446 km, considerada um importante corredor de transporte rodoviário no país, desde o entroncamento com a BR-040/MG, passando pelos estados da Bahia, Piauí até a capital do estado do Maranhão.

FIGURA 1.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: O autor (2018).

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

1.4.1 Cartografia por Imageamento

Os estudos geológicos foram realizados em etapas de escritório e de campo. As etapas de escritório constaram da realização de revisão e compilação de dados disponíveis na literatura, a integração de mapas geológicos e a fotointerpretação do imageamento em uma faixa de 200 m de largura para cada lado do eixo da estrada projetada.

Com objetivo de sanar os problemas oriundos da defasagem temporal das imagens de satélites disponíveis, bem como a melhoria da resolução espacial para que fosse possível otimizar a interpretação e caracterização geológica, foi utilizada uma plataforma VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado para a execução do imageamento aéreo, embarcado com sensor passivo.

Com uso do VANT foi possível a coleta de dados na camada visível do espectro, com resolução espacial de 15 cm, com a extração de feições na escala de até 1:750. As imagens de satélite com resolução espacial de 2,5 m, obteriam resultados com produtos na escala 1:12.500. Portanto, o uso das imagens coletadas pela plataforma VANT, facilitou a identificação e a localização das feições cársticas no terreno, permitindo concentrar os esforços de prospecção, diminuindo o tempo dos trabalhos em campo e os custos para sua execução.

As etapas de prospecção em campo corresponderam ao levantamento por caminhamento para reconhecimento detalhado das feições cársticas e das estruturas geológicas mapeadas na etapa anterior, associadas ao desenvolvimento de anomalias no subleito do corpo estradal ou dentro da área de proteção espeleológica, determinada pela legislação brasileira em 250 m de distância de qualquer cavidade.

1.4.2 Estudos geomorfológicos mediante imageamento aéreo

O equipamento utilizado para o imageamento aéreo foi uma plataforma autônoma VANT, modelo *Smartbird X-260 – Softmapping & Aerial Propeller*, fabricado em fibra de carbono e polipropileno que permite a tomada de fotografias

com alta resolução (FIGURA 1.2). As características técnicas do aparelho são descritas na TABELA 1.1.

FIGURA 1.2 – PLATAFORMA DE LANÇAMENTO E VANT – SMARTBIRD X-260.



Fonte: ITTI (2014).

TABELA 1.1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS – SISTEMA SMARTBIRD X-260.

Envergadura	2,60 metros
Dimensões	260cm x 80cm x 15cm
Área de asa	4000 cm ²
Velocidade de lançamento	75 km/h
Velocidade de cruzeiro	85 km/h
Velocidade máxima	125 km/h
Velocidade de pouso	60 km/h
Altitude máxima de voo	1000 metros = 1 km
Peso	6 quilos
Autonomia	60 minutos = 03 Baterias Lítio
Vento	Resistência de até 80 km/h
Sistema de rádio frequência	2,4 Hz – alcance de até 14km

Fonte: Smartbird X-260 (2014).

Além de sensores de movimento, GPS e piloto automático, que permitem a realização de voos autônomos do lançamento até o pouso, a plataforma foi embarcada com equipamento para captura das imagens com uma câmera digital de

pequeno formato da marca *Sony*, modelo *nex-c3*, (FIGURA 1.3), com as especificações técnicas descritas na TABELA 1.2.

FIGURA 1.3 – CÂMERA DIGITAL SONY NEX-C3.



Fonte: Sony (2014).

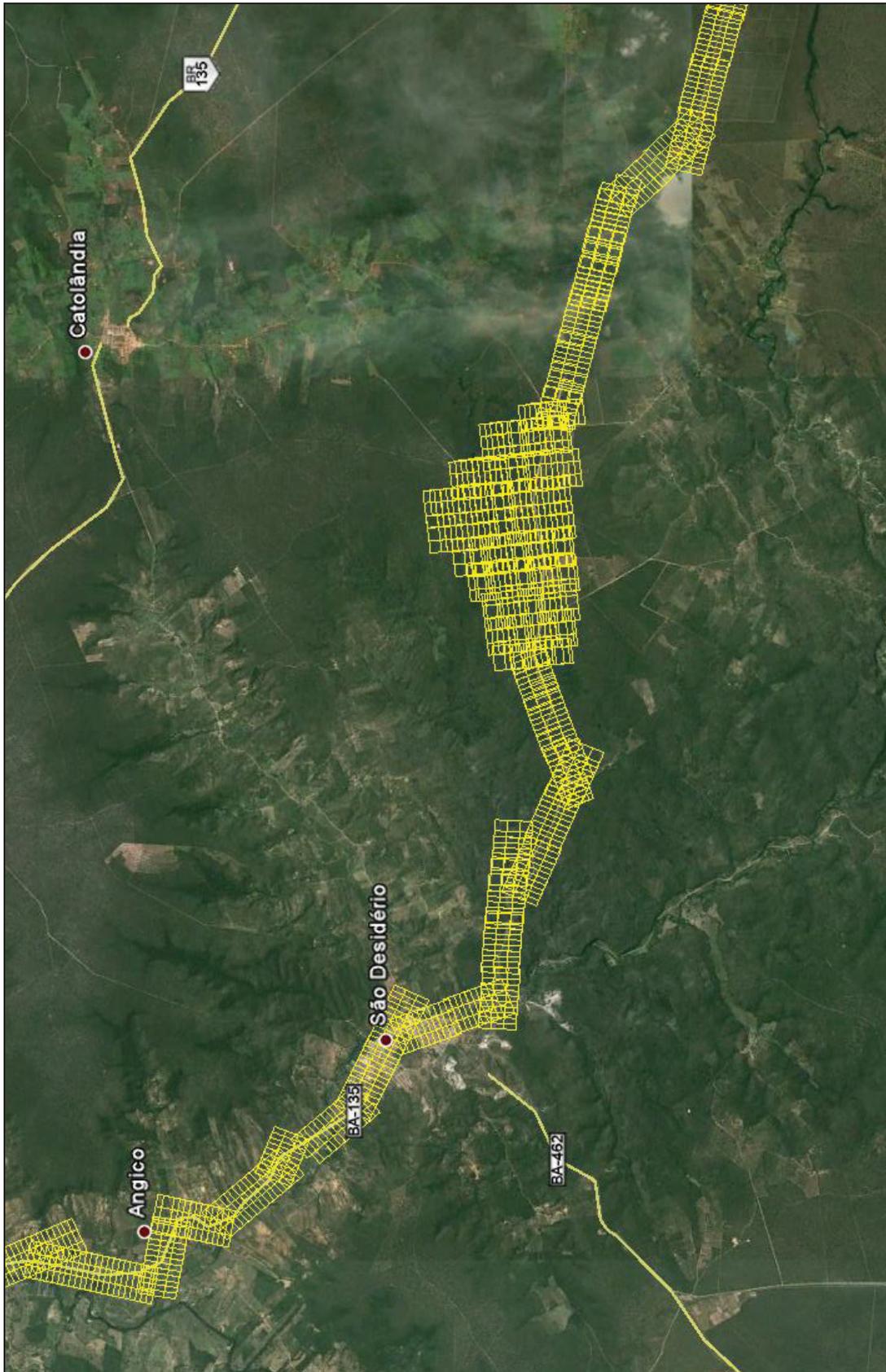
TABELA 1.2 – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – SONY, MODELO NEX-C3.

Resolução	16,2 Mega pixels – não calibrada
Tipo de sensor	APS-C
Tamanho do sensor	23,4 mm x 15,6 mm
Tamanho máximo da imagem	4.912 x 3.264
Distância focal	16 mm

Fonte: Sony (2014).

Foi elaborado um planejamento de voo para registrar a faixa de domínio da rodovia, totalizando uma largura média de 570 metros, ou seja, 285 metros para cada lado a partir do eixo. Para as demais áreas de interesse foram realizadas tantas faixas, quanto fossem necessárias até a cobertura integral do terreno, conforme ilustra a FIGURA 1.4.

FIGURA 1.4 – PLANEJAMENTO DE VOO.



Fonte: Imagens projetadas sobre imagem Google (2014).

1.4.3 Definições dos parâmetros de voo

Ao fixar a sobreposição longitudinal e lateral foi possível calcular a altura de voo que foi estabelecida para a tomada das fotografias. Para isto considerou-se a precisão dos equipamentos utilizados para a compilação do produto final.

Para o voo deste trabalho, foi considerada uma altura que permitisse uma sobreposição lateral de 52% e uma sobreposição longitudinal de 63%. Para se obter tais sobreposições, a altura média de voo foi definida em 300 m.

1.4.4 Recobrimento aerofotográfico

Para a execução do recobrimento aerofotográfico, considerou-se três etapas principais: a) deslocamento; b) decolagem e aterrissagem; e c) planejamento efetivo de campo. O primeiro refere-se ao deslocamento da equipe até o local de interesse. A decolagem e a aterrissagem foram executadas em locais que não comprometam a integridade da plataforma VANT. O planejamento efetivo de campo referentes às operações aéreas envolveu a verificação da altura do voo para tomada das fotos e registro de coordenadas geográficas de cada elemento a ser imageado, com a definição quanto a sua posição de tomada.

Após o lançamento do equipamento, ao atingir 300 m de altura, o “piloto automático” foi acionado. Com autonomia de sobrevoo de aproximadamente 1 hora e 10 minutos, resultando em aproximadamente 20 km de voo em cada faixa, totalizando 40 km diários.

Ao finalizar cada operação, as imagens foram analisadas no próprio local do evento a fim de se controlar a qualidade do material originado pelo sistema, quanto a nitidez da imagem, brilho, contraste e a posição em relação ao plano de voo inicial. A imagem final deveria apresentar os elementos geológicos perfeitamente visíveis para análise conforme ilustra a FIGURA 1.5.

FIGURA 1.5 – IMAGEM DE DOLINA ONDE ENCONTRA-SE A ENTRADA DE UMA CAVERNA.

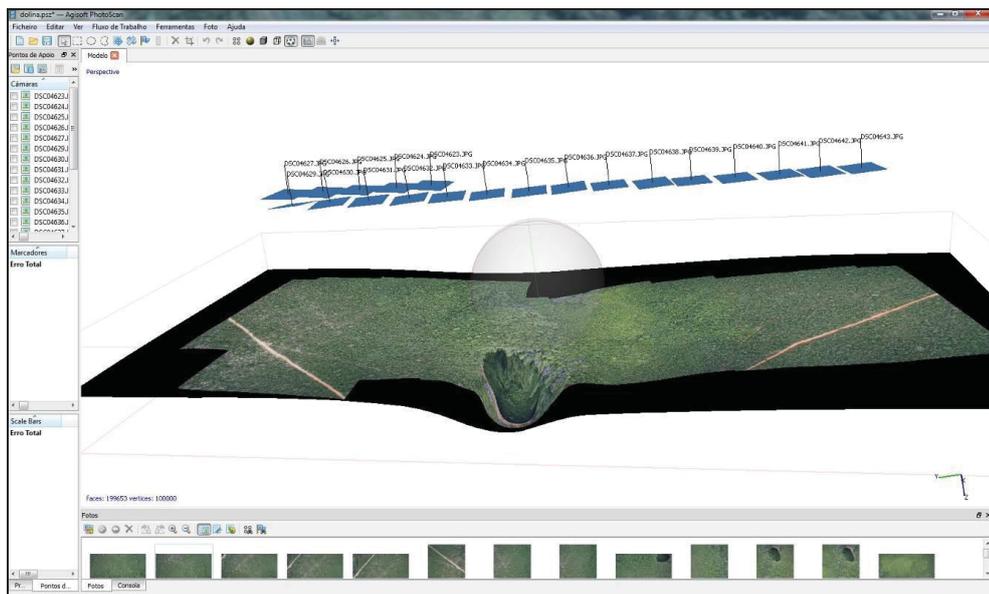


Fonte: ITTI (2014).

1.4.5 Processamento do mosaico digital

A fase de processamento do mosaico digital constituiu no ajustamento das imagens por um processo denominado aerotriangulação digital, com uso do *software Agisoft Photoscan*, resultando em imagem como demonstrado na FIGURA 1.6.

FIGURA 1.6 – AJUSTAMENTO DAS IMAGENS, AEROTRIANGULAÇÃO DA ÁREA DA CAVERNA SUCUPIRA.



Fonte: ITTI (2014).

A elaboração do mosaico ortorretificado se deu pela junção automática de todas as imagens que compõem a área de interesse. Essa junção foi realizada pela correlação matemática entre pixels de mesma coordenada no terreno. A FIGURA 1.7 ilustra a área correspondente a passagem da BR-135/BA sobre o sistema cárstico do Rio João Rodrigues, onde se localiza a caverna do Buraco do Inferno.

FIGURA 1.7 – MOSAICO ORTORRETIFICADO DA ÁREA CORRESPONDENTE A PASSAGEM DA BR-135/BA SOBRE O SISTEMA CARSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES E A CAVIDADE DO BURACO DO INFERNO.



Fonte: ITTI (2014).

1.4.6 Apoio do Sistema Global de Navegação por Satélite

Foi utilizado o apoio terrestre afim de obtenção de coordenadas e os níveis altimétricos referentes aos sinais dos satélites das constelações GPS, Glonass e

Galileo, formando o GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite), ou com o uso de estação total e níveis eletrônicos de alta precisão.

A finalidade do apoio terrestre por GNSS, para este levantamento aéreo foi a materialização do referencial geodésico (instalação dos pontos de apoio no terreno seguido da obtenção das coordenadas planialtimétricas com por meio de um sistema GNSS). Desta forma, foi indispensável determinar uma rede, suficientemente densa de pontos de apoio, facilmente identificáveis nas fotografias, dos quais se conheciam as exatas posições planialtimétricas no terreno, possibilitando solucionar o problema de rigidez geométrica e ajuste do referencial do ortomosaico. (FIGURA 1.8).

FIGURA 1.8 – PREPARO DE PONTO DE APOIO E QUIPAMENTO.



Fonte: ITTI (2014).

1.4.7 Pré-sinalização de pontos de apoio

A pré-sinalização consiste de uma marcação artificial no terreno, possível de ser identificada na imagem ou fotografia aérea, proporcionando medidas mais precisas das coordenadas de pontos de apoio necessários na fototriangulação convencional. De modo geral, o emprego de alvos pré-sinalizados contribuiu para aumentar a precisão dos produtos cartográficos resultantes e produzir alvos fotoidentificáveis bem definidos, em localização apropriada às etapas de orientação exterior e previamente definidas, para o planejamento e implantação de pré-

sinalização foram considerados a localização, as dimensões e os materiais de construção.

A localização das marcas foi planejada de acordo com o plano de voo da área levantada, devendo estar em concordância com os requisitos de distribuição geral e localização estratégica dos pontos de controle e amarração dos blocos. As marcas foram dispostas em terreno plano, com boa visibilidade de cima e longe de objetos altos (edifícios, árvores, aterros). Quanto maior o número de fotos em que um mesmo ponto é medido, mais confiáveis serão os valores finais das coordenadas calculadas.

As dimensões das marcas dependeram da escala da cobertura fotográfica realizada. A resolução da imagem digital sobre a qual foram medidas as coordenadas da foto foi um critério inicial para determinar a dimensão do alvo pré-sinalizado. As marcas foram confeccionadas com uso de tinta, telas plásticas ou tecidos resistentes fixados ao terreno, em cores que permitiram um contraste satisfatório em relação à cor predominante do entorno.

Para a pré-sinalização da área de interesse foram utilizados materiais (cal e lonas plásticas amarelas) com refletância destoante do solo da região. As dimensões (60 cm x 40 cm) dos alvos foram determinadas a partir da altura de voo e do tamanho do pixel no terreno (FIGURA 1.9).

FIGURA 1.9 – MARCAS DE PRÉ-SINALIZAÇÃO DE PONTOS DE APOIO NO TERRENO.



Fonte: ITTI (2014).

1.5 ANÁLISE DA GEOLOGIA ESTRUTURAL

A tomada de medidas para análise de geologia estrutural foi realizada durante levantamentos de campo, em afloramentos entre os km 206 e 226, da BR-135/BA (FIGURA 1.10 e FIGURA 1.11).

A análise de feições do relevo foi realizada mediante extração de lineamentos de imagens para apresentação de resultados em escala 1:100.00, a partir do relevo sombreado do Modelo Digital de Elevação (MDE) processados pelo TOPODATA. Posteriormente, os lineamentos foram processados com o *software Stereo32* para confecção dos diagramas de rosetas de comprimentos e de frequências de direção de lineamentos.

Foram medidos diversos planos de fraturas e falhas, não sendo possível identificar a cinemática das falhas. Os dados estruturais foram processados com o *software Wintensor v.5.8.4 (Delvaux e Sperner, 2003)* para confecção de estereogramas.

FIGURA 1.10 – OBTENÇÃO DE DADOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL NA ÁREA DE ESTUDO.



Fonte: O autor (2018).

FIGURA 1.11 – OBTENÇÃO DE DADOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL NO INTERIOR DA CAVERNA BURACO DO INFERNO.



Fonte: O autor (2018).

1.6 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ESPELEOLÓGICO

O processo de avaliação do potencial espeleológico iniciou-se com a aplicação de métodos indiretos de verificação da ocorrência de cavidades sob o eixo projetado da BR-135/BA. Para delimitar a área de estudos foram analisados dados obtidos com bases cartográficas, imagens de satélites, mapas geológicos, entrevistas com moradores locais e informações disponíveis no Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV/ICMBio e Sociedade Brasileira de Espeleologia.

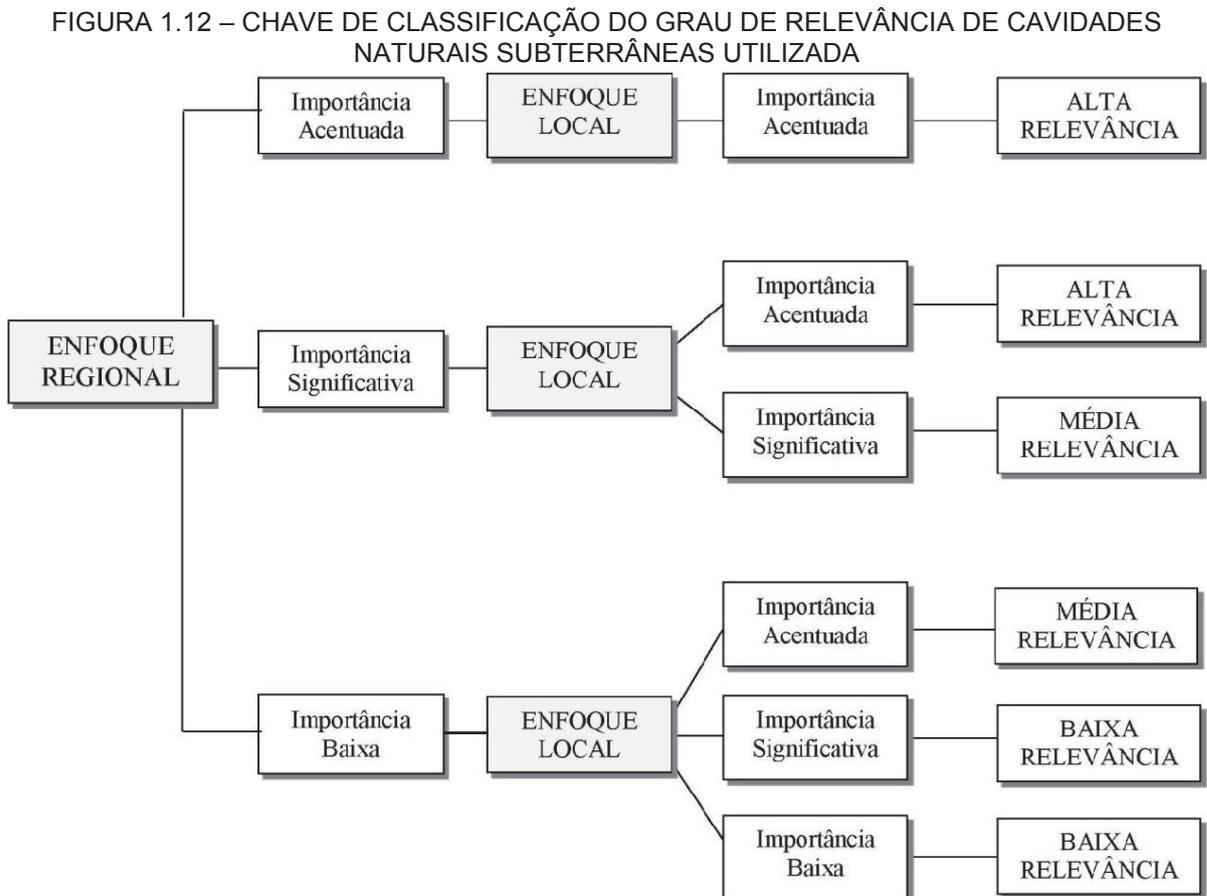
Priorizou-se então, o caminhamento prospectivo em linhas com equidistância máxima de 100 m nas zonas de maior potencial espeleológico, realizado em uma faixa de 250 m de distância, para cada lado do eixo da rodovia projetada.

No levantamento topográfico das cavidades, foi utilizado o método adotado pela *British Cave Research Association* (BCRA), com os seguintes equipamentos: bússola SUNNTO, para a medição dos ângulos horizontais; clinômetro SUNNTO, para a medição dos ângulos verticais; e trena *Laser Bosh DLR40*, para a determinação das distâncias.

1.7 DETERMINAÇÃO DO GRAU DE RELEVÂNCIA DAS CAVIDADES

O método utilizado para a realização da análise do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, foi estabelecido pela IN nº 002/2017 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2017). Tal método classifica as cavidades naturais subterrâneas de acordo com seu grau de relevância em máximo, alto, médio ou baixo, mediante análise de atributos e variáveis, constantes do Anexo II desta Instrução Normativa. Estes atributos são analisados de acordo com as características ecológicas, biológicas, geológicas, hidrogeológicas, paleontológicas, cênicas, histórico-culturais e socioeconômicas, avaliados em enfoque regional e local.

Quando a cavidade não apresentava nenhum atributo de máxima relevância, era realizada a avaliação sob enfoque local e regional, conforme o Anexo I da mesma legislação (FIGURA 1.12 e TABELA 1.3).



Fonte: Adaptado da IN nº 02/2017, BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (2017).

TABELA 1.3 – CLASSIFICAÇÃO DE IMPORTÂNCIA RELATIVA AOS ATRIBUTOS DA CAVIDADE NATURAL SUBTERRÂNEA ÁVALIADOS SOB OS ENFOQUES LOCAL E REGIONAL

IMPORTÂNCIA	NÚMERO DE GRUPOS DE ATRIBUTOS CONSIDERADOS MINIMAMENTE SIGNIFICATIVOS PARA A CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE RELEVÂNCIA	
	ENFOQUE LOCAL	ENFOQUE REGIONAL
Acentuada	4 a 8	2 a 4
Significativa	1 a 3	1
Baixa	0	0

Fonte: IN nº 02/2017, BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (2017).

Foram identificadas e mapeadas, as cavidades que apresentaram desenvolvimento predominantemente horizontal ou vertical, igual ou superior a 5 metros. Outras feições encontradas em campo, com dimensões menores que estas definições, foram consideradas feições espeleológicas secundárias. Essas feições correspondem a dolinas, buracos, pequenas fendas em paredões e espaços sob blocos desabados, que inclusive carecem de atributos para a sua caracterização como uma cavidade natural subterrânea.

Para efeito da análise da relevância das cavernas, com base na IN nº 02/2017, foi necessária a definição dos contextos regional e local referente ao patrimônio analisado. A área de estudo do contexto geológico regional situa-se na Província Espeleológica do Bambuí. A análise de detalhe local restringiu-se ao Distrito de São Desidério, onde foi feita a determinação da relevância das cavidades identificadas.

Ainda para análise da relevância, a IN nº 02/2017 exige a comparação dos dados dimensionais (projeção horizontal, desnível, área da projeção e volume) das cavidades envolvidas no levantamento e das cadastradas regional e localmente. Para atendimento desse quesito, pesquisaram-se os cadastros de cavidades disponíveis (CECAV/CANIE e SBE/CNC), que são atualmente os dois cadastros de referência para o patrimônio espeleológico conhecido no Brasil. O cadastro mantido pelo ICMBio/CECAV (CANIE), possui um número de cavidades cadastradas maior que o Cadastro mantido pela SBE (CNC). A título de ilustração, encontra-se um total de 19.000 cavidades (7.845 cavidades em MG) cadastradas no CANIE enquanto no CNC existem apenas 7.892 cavidades cadastradas no país (2.376 cavidades em MG), considerando-se dados de setembro de 2019.

Diante deste fato poderia se supor que melhor seria utilizar dados do CANIE para comparação dos dados regionais e locais necessários para determinação da relevância das cavidades. Infelizmente os dados disponíveis do CANIE referem-se somente à localização das cavidades (nome, município, localidade, latitude e longitude), não existindo dados relativos a outras informações (principalmente dados dimensionais) que seriam necessárias para comparação regional e local. Tendo em vista essa limitação do CANIE, tornou-se impositivo para as análises da relevância a utilização apenas dos dados do CNC/SBE, pois apesar de desatualizado em termos quantitativos, apresenta dados mais completos.

Ainda que o cadastro mantido pela SBE (CNC) apresente os dados dimensionais das cavidades, estes se resumem basicamente a informações da projeção horizontal (PHZ), desenvolvimento linear e desnível, não existindo qualquer dado relativo à área da projeção e volume das cavidades cadastradas. Essa ausência de dados de área da projeção e volume das cavernas cadastradas impossibilitou uma análise com relação a esses dois parâmetros dimensionais das cavernas analisadas.

Superadas as limitações relativas aos dados cadastrais disponíveis para análise e comparação, utilizaram-se os dados das cavidades cadastradas no CNC da SBE de acordo com o enquadramento local e regional das cavidades aqui estudadas, bem como para o cálculo dos percentis (TABELA 1.4) necessários para definição dos atributos dimensionais de relevância.

TABELA 1.4 – RESULTADOS DO CÁLCULO DE PERCENTIL PARA O ROL DE DADOS CONSIDERADOS REGIONAL E LOCALMENTE

DIMENSSÃO	PERCENTIL 50	PERCENTIL 20	8X MEDIANA
PHZ (regional)	100	20	800
Desnível (regional)	11,5	5	56
PHZ (local)	55	20	440
Desnível (Local)	10	2	80

Fonte: IN nº 02/2017, BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (2017).

Cabe destacar que os atributos relacionados ao meio biótico, referentes a animais invertebrados (principalmente troglóbios) e vertebrados (mastofauna, herpetofauna, avifauna e ictiofauna), os aspectos patrimoniais (incluindo arqueologia) e a prospecção paleontológica, foram realizadas e utilizadas para a

determinação do grau de relevância das cavidades. Estes resultados foram encaminhados para análise do IBAMA e não são apresentados neste estudo.

1.8 MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA DETECÇÃO DAS CAVIDADES SOB O EIXO DA RODOVIA

Na hipótese de que é possível determinar uma área de segurança estrutural para as cavernas em relação aos possíveis impactos ocasionados pela implantação e operação de obras rodoviárias, foram empregados métodos geofísicos de superfície combinados para delimitar a ocorrência e posição de cavidades em relação ao eixo da estrada projetada. Os métodos geofísicos foram escolhidos por serem não destrutivos e, em conjunto com os dados geológicos, satisfizeram os requisitos para as análises pretendidas. Os dados geofísicos foram obtidos, processados e interpretados pelo Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada da Universidade Federal do Paraná – LPGA/UFPR.

O primeiro método geofísico utilizado, o gravimétrico, avaliou o contraste de densidades do subsolo. O segundo, o radar de penetração no solo ou georradar (GPR), permitiu obter uma imagem na forma de seção de subsuperfície rasa do terreno, por reflexão de ondas eletromagnéticas de alta frequência. O terceiro, de resistividade e polarização induzida, permitiu discriminar estratos condutivos associados com os metacalcários, com possíveis cavernas (espaços não condutivos).

A integração dos resultados obtidos pelo uso combinado dos métodos geofísicos permitiu estimar a posição, as características geométricas, as dimensões e a profundidades das cavidades em relação a superfície, possibilitando a elaboração de mapas e perfis destas sob o eixo da rodovia.

1.8.1 Método geofísico com uso de *Ground Penetrating Radar* - GPR

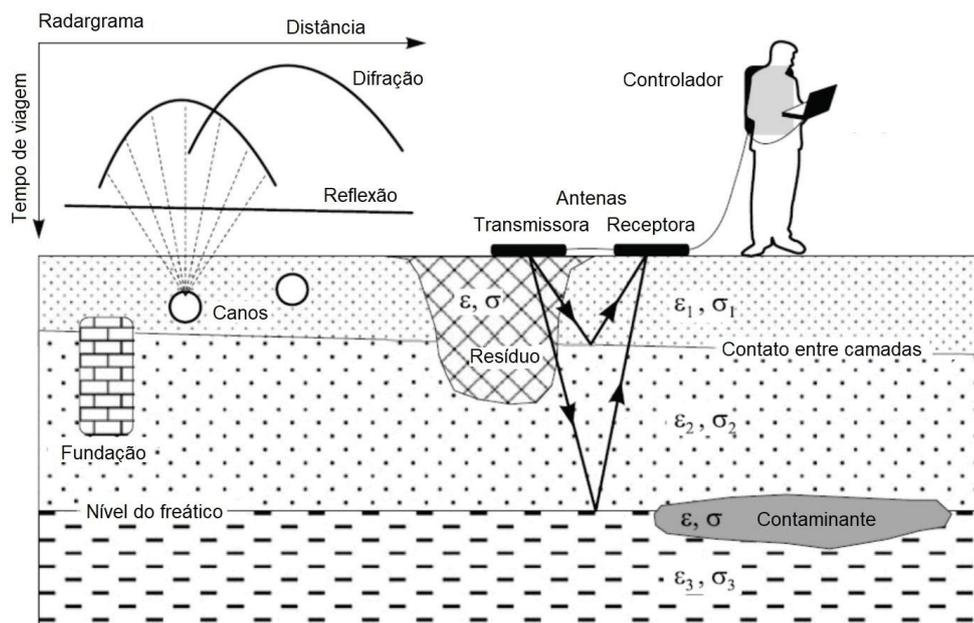
O GPR é um método geofísico não destrutivo, de alta resolução, e que permite obter uma imagem da subsuperfície rasa da Terra, através de reflexões de ondas eletromagnéticas de altas frequências oscilando entre 10 MHz a 3,5 GHz,

similar ao princípio das técnicas de reflexão de sísmica e sonar (PORSANI, 1999; ANNAN, 2002).

O GPR, também conhecido como Radar de Penetração no Solo ou Georadar, teve a sua primeira aplicação em 1929 na Áustria com a finalidade de investigar a espessura de uma geleira (OLHOEFT, 1996). O método evoluiu como nova ferramenta da geotecnologia, e hoje tem aplicações em diversas áreas, como: exploração mineral, hidrogeologia, geologia ambiental, arqueologia, geotecnia, geologia forense e engenharia.

Este método consiste na transmissão de ondas eletromagnéticas repetidamente radiadas para o interior do terreno por uma antena transmissora posicionada na superfície. Existindo mudança em pelo menos uma das propriedades físicas (permissividade e permeabilidade magnética) dos materiais da subsuperfície essas ondas refletem. Então, parte do sinal das ondas refletida é captada por outra antena, também na superfície do terreno, denominada de receptora (FIGURA 1.13). Esta energia refletida é detectada e registrada em função do tempo de propagação da onda, amplificada, digitalizada e armazenada em uma unidade de controle e depois processadas em software específicos, gerando imagens em alta resolução (Davis; Annan, 1989).

FIGURA 1.13 - PRINCÍPIOS DO FUNCIONAMENTO DO MÉTODO GPR E SUAS APLICAÇÕES



Fonte: modificado de Annan (2001).

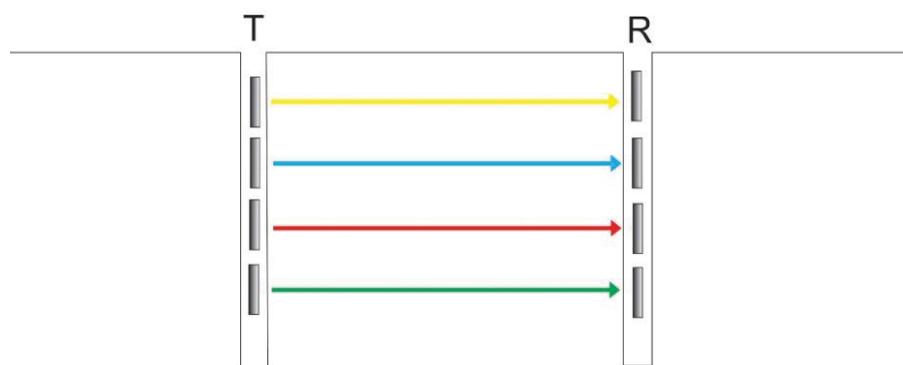
1.8.1.1 Profundidade de penetração

Segundo Olhoeft (1984) a profundidade de penetração é condicionada pela condutividade elétrica (σ), conteúdo de água e de argila e heterogeneidade geológica do terreno. Parasnis (1997) mostra que a profundidade de penetração depende mais da condutividade do meio do que da frequência utilizada no levantamento. Já para Daniels (1989) a condutividade elétrica e a frequência da antena condicionam a profundidade de penetração. O uso do equipamento adequado, determinada principalmente pela frequência da antena, é um fator determinante para o sucesso na obtenção das informações sobre o meio que está sendo analisado. Entretanto, outros fatores influenciam a profundidade de penetração, os quais estão relacionados com a perda de energia na propagação, como espalhamento geométrico, atenuação pelo terreno, partição da energia entre as interfaces e relaxação dielétrica.

1.8.1.2 Técnicas de aquisição

As técnicas de aquisição do GPR estão relacionadas aos arranjos das antenas e podem ser de três tipos: transiluminação, *common midpoint* (CMP ou sondagem de velocidade) e *common offset* (CO ou perfil de reflexão de afastamento constante). Na transiluminação, as antenas transmissora e receptora são montadas em poços de investigação. Paralelamente ao deslocamento das antenas (transmissora e receptora) nos poços, onde são produzidas imagens através da transmissão direta e não por reflexão (FIGURA 1.14).

FIGURA 1.14 – ILUSTRAÇÃO DA TÉCNICA DE TRANSILUMINAÇÃO

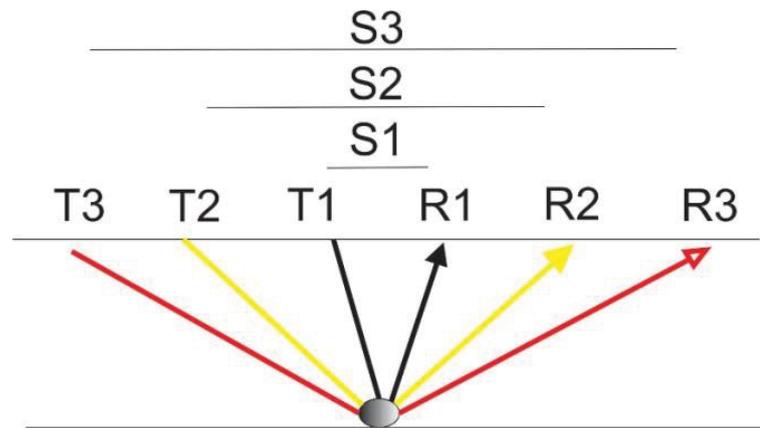


T = Antena transmissora, R = Antena receptora

Fonte: modificado de Jol (2009).

O *common midpoint* é utilizado para estimar a velocidade de propagação da onda em função do tempo duplo dos perfis de reflexão em profundidade. As antenas são deslocadas em sentidos opostos de forma crescente em relação a um ponto fixo central (FIGURA 1.15).

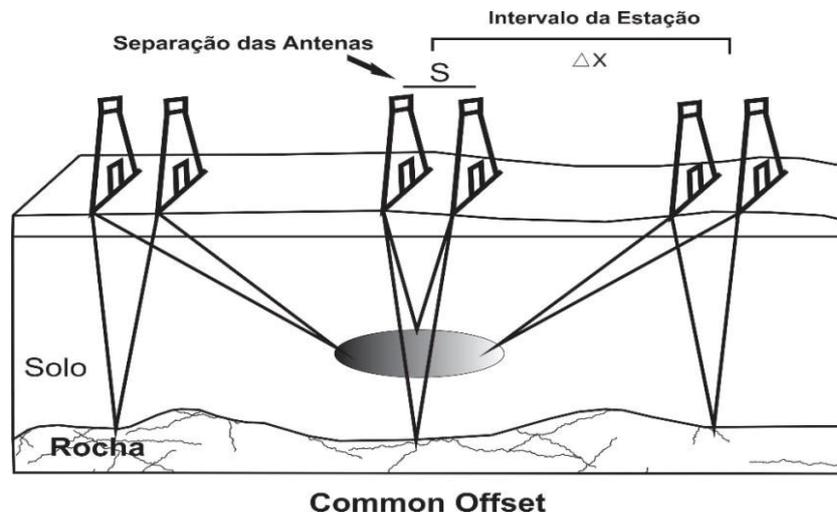
FIGURA 1.15 - ILUSTRAÇÃO DA TÉCNICA *COMMON MIDPOINT*



T = antena transmissora, R = antena receptora. S1, S2, S3 = separação entre T e R

Fonte: Modificado de Annan (2001).

No perfil de reflexão (CO), as antenas de transmissão e recepção são espaçadas de uma mesma distância (S) e são deslocadas no mesmo sentido, realizando desta forma medições em intervalos regulares (ΔX). Assim, os sinais captados são empilhados verticalmente de acordo com o tempo duplo do sinal e lateralmente em função do deslocamento das antenas (distância), mostrando assim variações das propriedades dielétricas dos objetos em subsuperfície (FIGURA 1.16).

FIGURA 1.16 – REPRESENTAÇÃO DA TÉCNICA *COMMON OFFSET*

Fonte: modificado de Annan (2001).

1.8.1.3 Aquisição e processamento dos dados

Para a aquisição dos dados geofísicos de GPR foi utilizado o equipamento SIR3000 (fabricado pela *Geophysical Survey Systems – GSSI*, FIGURA 1.17 A), e acoplado a uma antena blindada de 270 MHz, utilizando a técnica *common offset*. Os parâmetros de campo utilizados no sistema GPR foram: espaçamento entre os traços de 1,0 cm, 512 e 1024 amostras por traço, intervalo de amostragem temporal de 0,52 ns e 0,20 ns (para as respectivas amostras por traços) e janela temporal de 270 e 200 ns.

FIGURA 1.17 – GPR. A) EQUIPAMENTO UTILIZADO; B) CAMINHAMENTO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO



Fonte: ITTI/UFPR (2015).

Os dados foram processados no *software* ReflexW, versão 7.0 (SANDMEIER, 2010). O processamento de dados do GPR incide no conjunto de procedimentos de tratamentos de sinais aplicados aos dados digitalizados, com o intuito de torná-los adequados à interpretação visual, produzindo seções mais nítidas e com melhor resolução temporal.

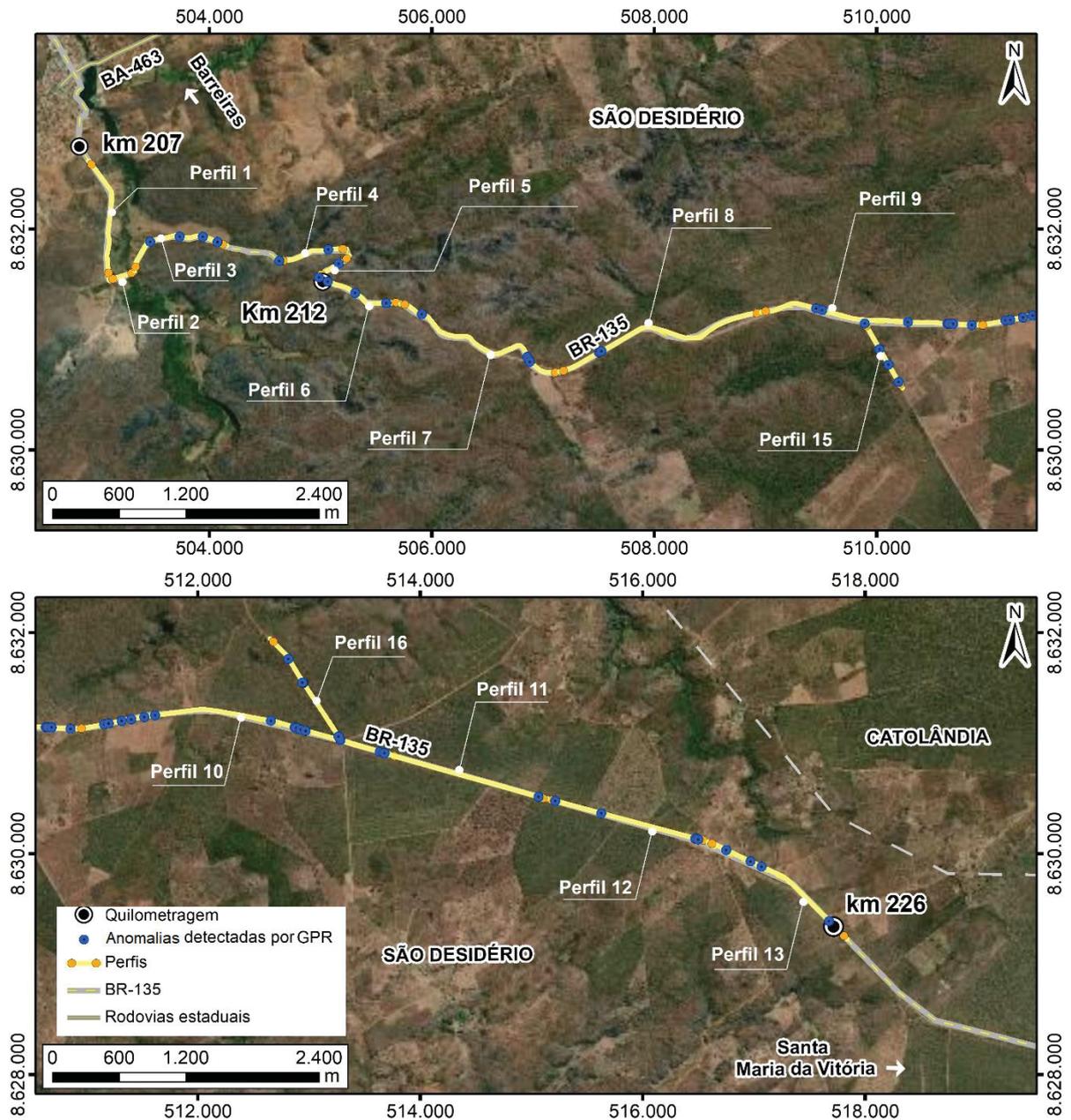
As etapas de processamento e os filtros utilizados para geração da imagem final (radargrama) foram os seguintes:

- Importação dos dados: criação de uma pasta, projeto, com todos os dados adquiridos em campo, conversão no formato DZT para DAT e importação para o programa *ReflexW*;
- *Staction correction*: define o tempo zero de cada traço ao longo do radargrama;
- Filtro FK: empregado para atenuar ruídos de reverberações. Sua aplicação envolve a geração do *fk spectrum*, o qual realiza a transformada de Fourier dos dados do domínio do tempo-espaco para o domínio frequência-número de onda e fornece o espectro fk correspondente. Todavia, o uso do filtro Fk acarreta no aumento do ruído de alta frequência, ocasionando o cruzamento de refletores;
- Filtro 2D (*Remove Background*): filtro usado para eliminar os ruídos coerentes das ondas diretas, ajudando a visualizar reflexões mais rasas;
- *Gain*: utilizou-se o *energy gain* para ressaltar a amplitude dos refletores mais profundos, compensando a atenuação do sinal com a profundidade;
- Filtro *passband frequency*: usado para remover frequências indesejadas ou retirar ruídos de alta e baixa frequência, permitindo a passagem da frequência dentro da banda especificada;
- Migração/conversão tempo em profundidade: utilizou-se do filtro *diffraction stack* para migrar os refletores numa disposição adequada, através do método de ajuste hiperbólico para identificar a velocidade do meio (0,14 m/ns) e converter os radargramas para a profundidade real;
- Correção topográfica: inserção de cotas altimétricas nos perfis.

A aquisição dos dados foi realizada entre os dias 5 e 9 de outubro de 2015, com perfis entre os quilômetros 209 e 226 da rodovia BR-135/BA, totalizando 20.070 metros de dados bidimensionais de alta resolução distribuídos em 15 perfis, sendo

13 ao longo do traçado atual não pavimentado e dois em estradas vicinais transversais (FIGURA 1.18).

FIGURA 1.18 – LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS E DE POSSÍVEIS CAVIDADES, INTERPRETADAS COMO PEQUENOS CANAIS DE DISSOLUÇÃO



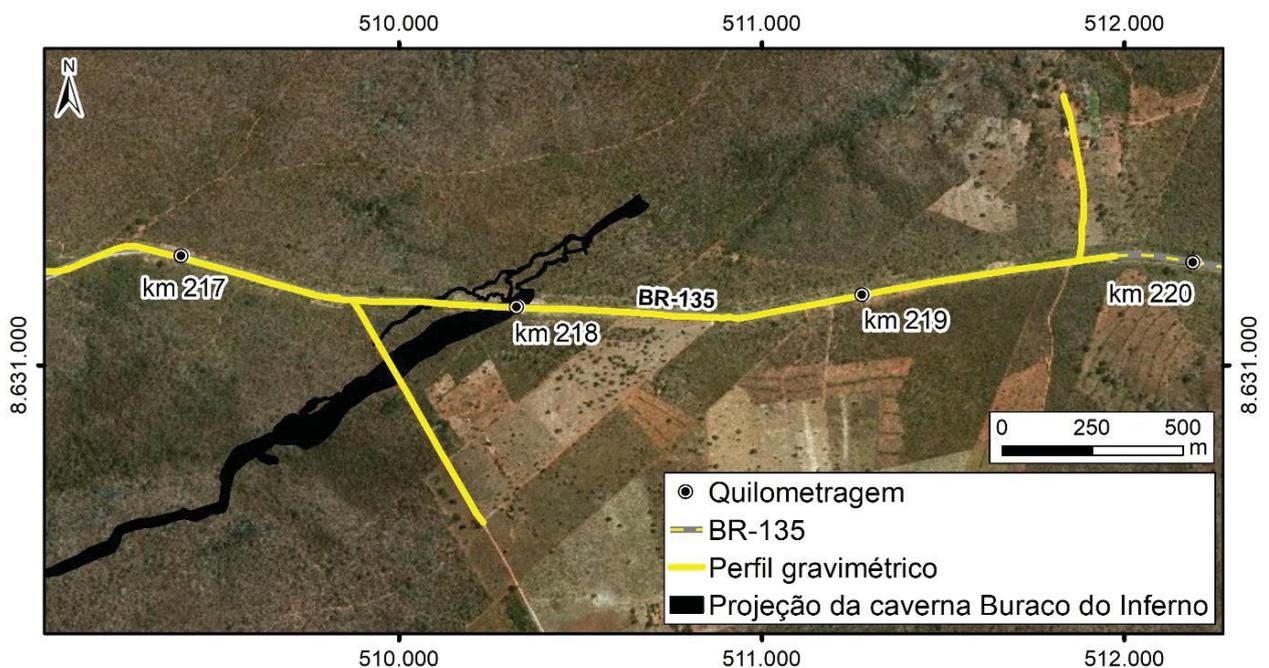
1.8.2 Método geofísico gravimétrico

A gravimetria é um método geofísico baseado na diferença de densidade entre os diversos materiais que compõem a crosta terrestre. A aquisição dos dados

gravimétricos foi realizada entre os dias 20 e 24 de março de 2014, entre os km 208 e 226 da rodovia BR-135/BA. O objetivo de realizar o levantamento foi detectar possíveis cavidades preenchidas ou não por sedimentos e/ou água, por meio do contraste de densidade entre os meios.

O levantamento gravimétrico foi executado em linhas paralelas com extensão variada, espaçadas de 25 m, em média, e densificadas com espaçamento de 5 m sobre as zonas de interesse, além de pontos de conexão entre as linhas totalizando 2.519 estações (FIGURA 1.19). Os dados resultantes do processamento estão no sistema de coordenadas Datum SIRGAS 2000 e Sistema de Projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), fuso 23 Sul.

FIGURA 1.19 - LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS GRAVIMÉTRICOS EXECUTADOS NA ÁREA DE ESTUDO



Fonte: ITTI/UFPR (2019).

A base de referência utilizada para transporte do valor da gravidade foi a Base a Código: 8094033 – RN2778T, pertencente à Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira materializada por meio de uma chapa fixada no piso (FIGURA 1.20), do lado direito do portão principal do prédio da Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco - Codevasf - na Rua Professor José Seabra, 420, no Bairro São Paulo, na Cidade de Barreiras.

FIGURA 1.20 - BASE DE REFERÊNCIA PARA O VALOR DE GRAVIDADE NA ÁREA DE ESTUDO



Fonte: ITTI (2014).

1.8.2.1 Aquisição dos dados

Os dados foram adquiridos por um gravímetro relativo modelo CG-5 (FIGURA 1.21), cujas especificações e procedimentos de medição são listados a seguir:

- gravímetro serie CG-5, número de série 121040986, de marca *Scintrex Limited*;
- resolução de 0,001 mGal, deriva menor que 0,02 mGal/dia;
- *Autograv meter* CG-5 faz leituras automaticamente, com base em um microprocessador, permitindo obter registros numa faixa de 7000 mGals, resolução 0.005 mGal, deriva de 0.02 mGal/dia;
- as leituras podem ser tomadas em série (repetidas) numa mesma estação, as quais são armazenadas na memória do instrumento e posteriormente transferidas para um microcomputador, ou *laptop*, onde são corrigidas e processadas;
- as leituras são feitas automaticamente, após o equipamento estar nivelado sobre uma estação. A operação de nivelamento é assistida por sensores de alta precisão. Caso o equipamento não esteja devidamente nivelado, dentro de certos limites, a leitura não é aceita.
- o tempo de tomada dos registros da aceleração da gravidade foi de 120 segundos, sendo a leitura final representativa do valor médio das amostras acompanhado de seu respectivo desvio padrão;

- ao final deste processo, a leitura é armazenada na memória do equipamento simultaneamente com outras variáveis: número da estação, desvio padrão da média, duração da leitura, correção de maré terrestre, número de amostras rejeitadas e as inclinações nos eixos X e Y; e
- para a calibração do instrumento, a operação no modo cíclico é feita por um período superior a 12 horas gerando um conjunto de dados que permitem calcular um novo fator de correção automática de *drift* o qual é atualizado no equipamento antes do início do levantamento. Também são verificados periodicamente a compensação da temperatura de operação do equipamento e o erro de zero dos sensores de inclinação.

FIGURA 1.21 – GRAVÍMETRO DIGITAL CG-5, SCINTREX, COM GPS L1/L2



Fonte: ITTI (2014).

1.8.2.2 Processamento dos dados

O processamento primário envolve duas etapas: a correção de deriva instrumental estática e dinâmica (*drift*) e a obtenção dos valores absolutos da gravidade (g) de cada estação.

A correção de maré é executada automaticamente no programa do gravímetro a partir das fórmulas de Longman (Longman, 1959), com os parâmetros de entrada, latitude e longitude referidas ao *datum* Córrego Alegre, mais a diferença

de fuso em relação a *Greenwich* inseridos antes da medida em campo, para cada estação.

As correções de derivas instrumentais foram calculadas com o auxílio de uma planilha do programa *Microsoft Office Excel*.

- A *deriva estática* ocorre por variações nos parâmetros internos do instrumento quando este se encontra parado, não executando leitura, durante o pernoite ou mais de uma hora diurna em período estático. É a soma da diferença entre a leitura imediatamente anterior ao período de repouso e a leitura imediatamente posterior ao período de repouso, aos valores adquiridos desde a leitura imediatamente posterior ao último período de repouso até a última leitura antes do próximo repouso estático.
- A *deriva dinâmica* ocorre por variações nos parâmetros internos do instrumento quando este se encontra em campo executando leituras (choques, variações de temperatura etc.). É a soma da diferença entre as leituras de início e de fechamento na base (já corrigidas de deriva estática) dividido pelo tempo total do levantamento e multiplicado pelo tempo dinâmico correspondente de cada estação.

Após as três primeiras etapas, a diferença de leitura de cada estação em relação à base é somada ao valor absoluto da gravidade desta base obtendo-se assim o valor absoluto da gravidade de cada estação levantada.

1.8.2.3 Processamento Secundário – Anomalia *Bouguer* - Δg_B

De posse dos valores absolutos de g de cada estação é gerado a anomalia *Bouguer*. Os valores de g são obtidos a partir de medições executadas na superfície física da terra, porém todos os procedimentos e fórmulas envolvendo o cálculo da anomalia *Bouguer* são baseados em uma superfície de referência chamada geóide.

O geóide é a superfície equipotencial coincidente com o nível médio dos mares (altitude = 0), prolongada sobre os continentes, sem variação de pressão atmosférica e sem o efeito de atração de outros corpos celestes.

A anomalia *Bouguer* (Δg_B) é a diferença entre os valores de g medido na superfície física (g_{obs}), reduzido ao geóide, e o valor da gravidade normal (g_n), calculado para a latitude de referência empregada na correção homônima, sobre o

esferóide (modelo matemático de uma superfície equipotencial que mais se aproxima do geóide).

1.8.2.4 Geração dos perfis

Mapas e perfis de anomalias *Bouguer*, mapas e perfis residuais, e derivadas verticais foram então gerados. Os “*grids*” para elaboração dos mapas foram criados por interpolação numérica, pelo método da curvatura mínima (BRIGGS, 1974) e triangulação. Os “*grids*” foram interpolados a um quarto do espaçamento médio de aquisição entre estações, respeitando a frequência de *Nyquist*.

1.8.2.5 Separação regional-residual

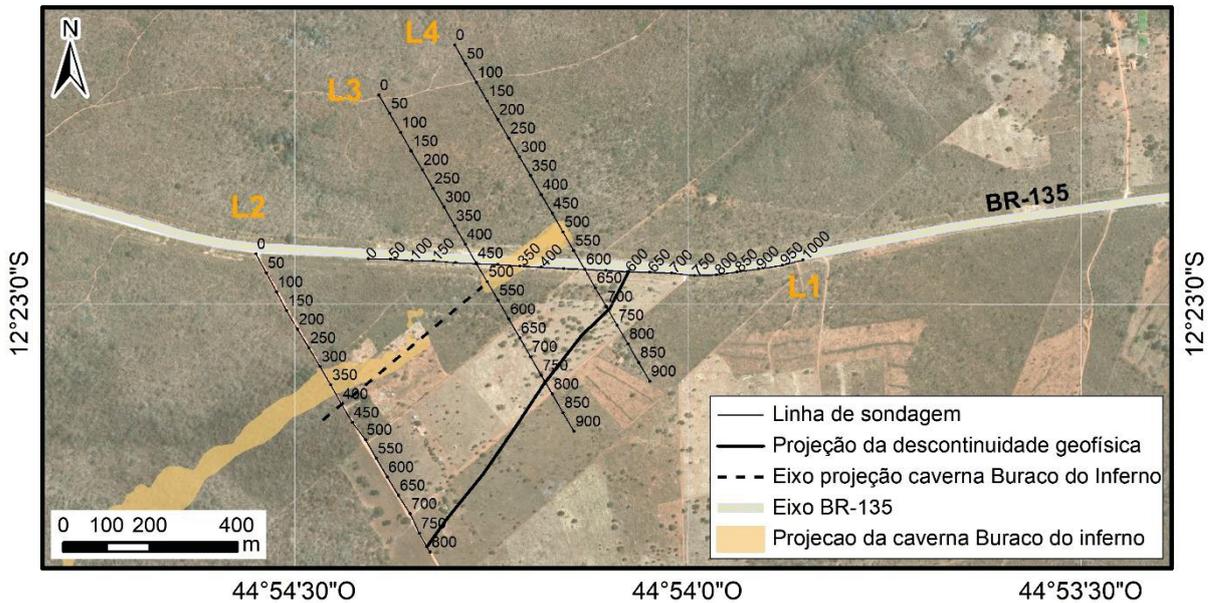
As anomalias *Bouguer* refletem fontes situadas a várias profundidades, desde as mais rasas (altas frequências) até as mais profundas (baixas frequências) a separação regional-residual consiste em extrair dos dados *Bouguer* os valores regionais (fontes profundas), obtendo os dados que refletem fontes mais rasas, denominados de resíduos.

Numericamente, a separação regional-residual foi realizada pelo método polinomial. Esta operação envolveu a subtração de uma superfície de tendência de graus um aos dados *Bouguer*, resultando nas anomalias regionais e residuais.

1.8.3 Método resistividade e polarização induzida

Os ensaios geofísicos com o método de resistividade e polarização induzida foram realizados ao longo de quatro linhas de IP/Resistividade, envolvendo 3600 metros de perfilagem, sob traçado da rodovia BR-135/BA na área de cruzamento com o Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues que abriga a cavidade Buraco do Inferno, prospectada pelo método gravimétrico, nas proximidades do km 218 (FIGURA 1.22).

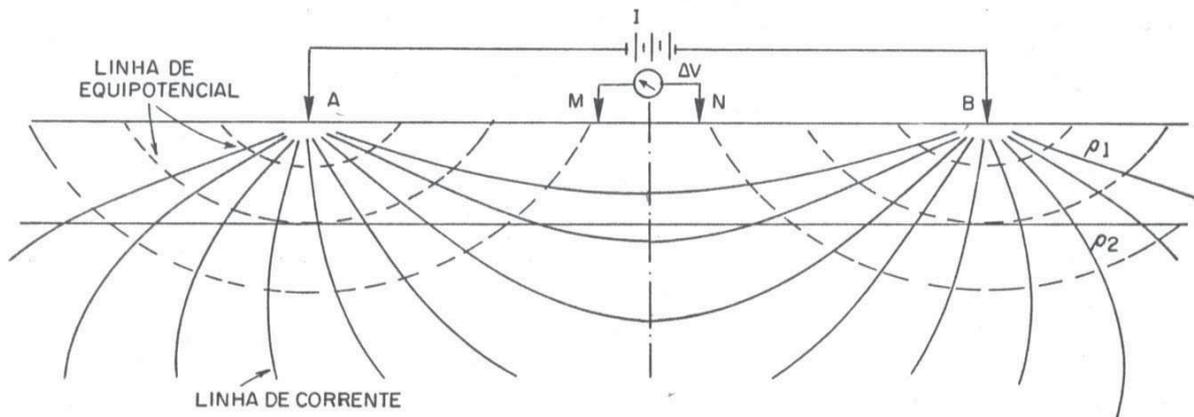
FIGURA 1.22 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS LOCAIS DE ENSAIOS GEOFÍSICOS NA BR-135/BA



Fonte: ITTI (2020).

O princípio dos métodos elétricos de prospecção é baseado na injeção, no terreno, de uma corrente I , através de dois eletrodos, A e B, e na medida da diferença de potencial ΔV , entre outros dois eletrodos M e N (FIGURA 1.23).

FIGURA 1.23 – FUNCIONAMENTO DO MÉTODO ELÉTRICO DE PROSPECÇÃO



Arranjo schlumberger. Modificado de Telford (1990).

A função resistividade aparente (ρ_a) é dada pela expressão (1.1):

$$\rho_a = K * \Delta V / I \quad (1.1)$$

Onde o fator K que multiplica $\Delta V/I$ é puramente geométrico e depende apenas da disposição dos eletrodos A, B, M e N. A resistividade aparente (ρ_a) não é um parâmetro físico do meio, mas um efeito integrado sobre um segmento do semi-espaço, para a qual contribuem: os valores da resistividade em cada ponto, a geometria elétrica do terreno e a disposição geométrica dos eletrodos.

1.8.3.1 Polarização Induzida

Quando uma corrente elétrica que circula no terreno é interrompida, a voltagem entre os eletrodos M e N não decai instantaneamente para zero. Durante o fluxo de corrente podem surgir concentrações de carga em várias partes do semi-espaço. Depois da interrupção da corrente, as cargas elétricas tendem a retornar à sua condição original, enquanto o voltímetro continua a indicar um sinal fraco. Durante alguns segundos, ou minutos, uma determinada fração da voltagem inicial permanece no terreno enquanto as concentrações de cargas são dissipadas. Este fenômeno é conhecido como polarização induzida (*induced polarization – IP*).

Durante muitos anos os geofísicos conviveram com os potenciais induzidos durante levantamentos de eletrorresistividade. Apesar de Schlumberger ter verificado o fenômeno antes de 1920, as aplicações modernas iniciaram-se a partir de 1948, inicialmente para prospecção de metais base, e, mais recentemente, à exploração de águas subterrâneas, aproveitando-se da propriedade de que a água não se polariza, ao contrário das argilas.

Para um fluxo ininterrupto de corrente, a polarização induzida depende da impedância do terreno e da frequência da corrente. Define-se impedância como a resistência aparente de uma substância frente ao fluxo de correntes alternadas, de forma análoga à resistência de um circuito elétrico. O fenômeno da polarização induzida pode ser observado nos domínios do tempo e da frequência.

A condução elétrica no terreno é normalmente iônica, mas algumas vezes pode ser obstruída por quantidades maiores ou menores de partículas minerais (por exemplo, grãos de pirita), nas quais quem transporta a corrente elétrica são os elétrons. Este fenômeno é bem conhecido quando uma corrente que passa por um eletrodo de metal (condutor eletrônico), inserido num eletrólito, pode aumentar a carga continuamente, de baixo para cima, na interface do eletrodo com o meio circundante, quando os demais processos da reação eletrolítica não se desenvolvem

com a mesma velocidade. Isto produz a denominada polarização de eletrodo. A carga extra acumulada difunde-se no eletrólito, quando a corrente é interrompida, restabelecendo-se o equilíbrio original, no qual uma película de íons negativos adere ao eletrodo de metal.

A polarização induzida também é observada na ausência de minerais eletronicamente condutores. A presença de argila é uma condição necessária para a existência deste fenômeno, porém o mesmo não é observado em areias quartzosas ou em outro meio desprovido de argilas. A polarização de membrana, como este efeito tem sido chamado, é provavelmente devida a trocas iônicas e à disposição da difusão de potenciais.

A superfície das partículas de argila, as bordas ou extremidades de corpos acamadados, materiais fibrosos ou planos de clivagem, normalmente aprisionam cargas negativas não balanceadas que atraem uma nuvem de íons positivos do eletrólito. Quando uma corrente elétrica interage com um sistema eletrólito-argila, os íons positivos podem facilmente atravessar aquela nuvem, porém os íons negativos são bloqueados formando zonas de concentração iônica.

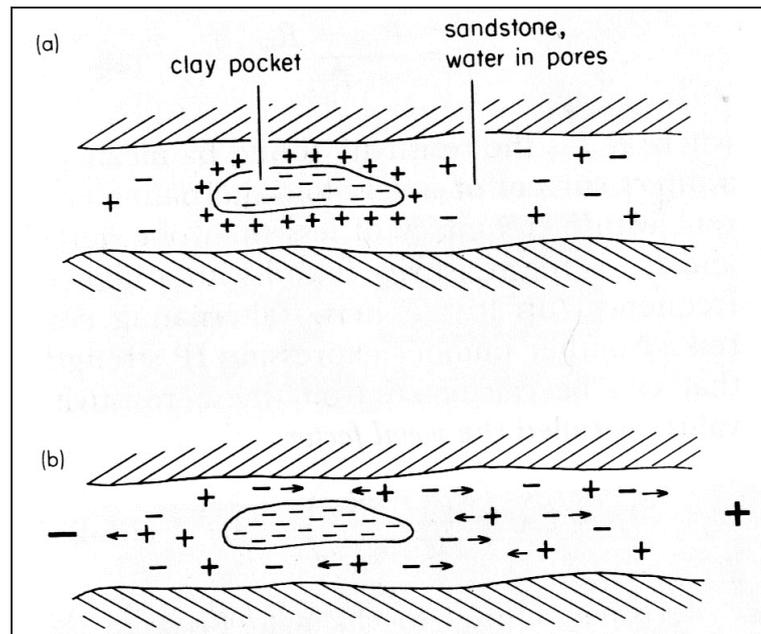
O retorno destes íons à sua distribuição de equilíbrio, depois de cessada a corrente, gera uma corrente residual responsável pelo efeito de polarização induzida. Superficialmente, de acordo com observações experimentais, os efeitos de polarização de membrana e de eletrodo são semelhantes entre si. Entretanto, não existe uma feição diagnóstica, não ambígua, que possa distinguir estes dois fenômenos durante as operações de campo. Existem diversas explicações teóricas para esses efeitos, tanto em escala macroscópica, quanto microscópica.

No substrato, o balanço químico é normalmente estabelecido entre as cargas elétricas dispostas na superfície dos minerais e os íons das águas que saturam os poros. Os íons positivos oriundos da decomposição das moléculas de água tendem a se concentrar em torno das partículas de argila negativamente carregadas e os íons negativos são atraídos pelas cargas positivas da superfície de alguns grãos de areia. Entretanto, a mobilidade dos íons mantém posições que permitem uma neutralidade elétrica.

O balanço natural de cargas, que equivale a uma bateria gasta, é interrompido por uma corrente elétrica que circula no terreno, a qual age como se a bateria fosse recarregada. Isto significa que as cargas positivas e negativas circulam de um lado para o outro (FIGURA 1.24). O efeito de recarga é mais forte nas zonas

de elevadas densidades de corrente, as quais correspondem às áreas de mais baixas resistividades. É nestas zonas de resistividade mais baixas que as cargas apresentam mais mobilidade.

FIGURA 1.24 – DISTRIBUIÇÃO DE ÍONS E PARTÍCULAS SEDIMENTARES ELETRICAMENTE CARRREGADAS NUM AMBIENTE NATURAL



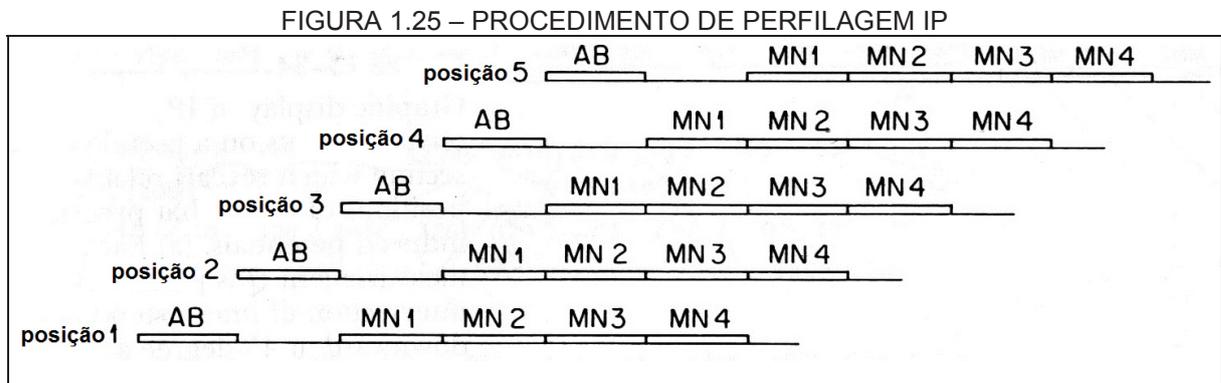
Fonte: Adaptado de Robinson e Corun (1998).

1.8.3.2 Arranjo Dipolo-Dipolo

Na prática dos levantamentos de imageamento elétrico ou de polarização induzida, denomina-se geralmente a fonte de corrente como circuito transmissor, ou simplesmente transmissor, e os circuitos relacionados com os eletrodos de potencial como receptor. O arranjo dos eletrodos normalmente utilizado neste tipo de levantamento é o dipolo-dipolo, onde a separação entre os eletrodos de corrente (AB) é a mesma dos eletrodos de potencial (MN), e a distância entre seus pontos médios é um múltiplo deste espaçamento.

Os caminhamentos elétricos ou perfilagens são usualmente feitos ao longo de linhas do terreno. O procedimento mais comum é posicionar os eletrodos de corrente (AB) no início da linha. As leituras são feitas para posições de pares sucessivos de eletrodos de potencial (MN), igualmente espaçados. O transmissor

(AB) é então deslocado para a próxima posição, na mesma linha, e o procedimento é então repetido (FIGURA 1.25).



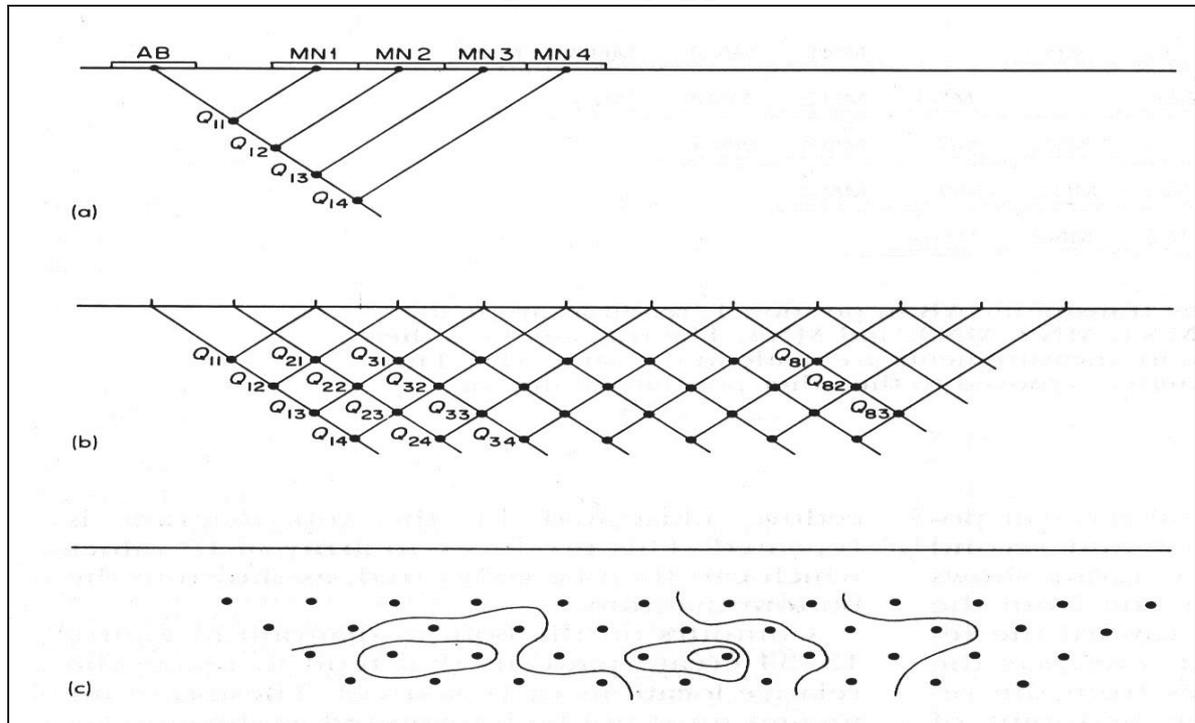
Fonte: Robinson e Corun (1988).

Os valores medidos ao longo do perfil são anotados como apresentado na FIGURA 1.25. As posições do transmissor (AB) e do receptor (MN) são indicadas pelo primeiro e pelo segundo número, respectivamente. A posição do transmissor está relacionada a uma linha que parte do ponto médio entre os eletrodos de corrente, segundo um ângulo de 45° . Esta linha é interceptada por outras, também com inclinações de 45° , partindo do ponto médio de cada par de eletrodos de potencial. Os valores medidos pelo receptor, nas diferentes posições, são colocados nas interseções entre as linhas inclinadas. Os pontos assim desenhados situam-se abaixo da metade da distância entre os pontos médios transmissor-receptor ao longo da linha do levantamento. A profundidade destes pontos aumenta na medida em que a separação transmissor-receptor aumenta. Entretanto, não existe uma relação direta entre estes pontos e o posicionamento das fontes de IP, embora se espere que os sinais das fontes profundas reflitam nas leituras onde a separação transmissor-receptor seja maior.

A FIGURA 1.26 mostra os pontos de leitura (interseções), a partir de posições sucessivas do transmissor. Para cada posição o procedimento ilustrado na figura anterior é repetido (FIGURA 1.25). Esta forma de apresentação dos dados, denominada pseudoseção, permite que os valores de IP sejam *contornados* (FIGURA 1.26 C), gerando uma imagem da posição relativa das fontes. Entretanto os contornos não refletem a posição real das fontes de IP, mas uma aproximação de onde, ao longo do perfil, uma determinada fonte pode estar situada e se a mesma é relativamente rasa ou profunda. É usual nos levantamentos de IP também

representar simultaneamente e da mesma forma, os valores da resistividade aparente.

FIGURA 1.26 – REPRESENTAÇÃO DE UMA PSEUDOSEÇÃO DE MEDIDAS DE UM CAMINHAMENTO ELÉTRICO INDICANDO A POSIÇÃO RELATIVA DE ZONAS QUE PRODUZEM POTENCIAIS INDUZIDOS



Fonte: Robinson & Corun (1988).

1.8.3.3 Método de Inversão

Todos os métodos de inversão buscam, essencialmente, encontrar um modelo cujas respostas estejam em conformidade com os dados medidos. No método calcado em células, usado pelo programa *Zonge 2D Inversion for Interactive™ IP*, da *Geosoft/Interpex*, os parâmetros são os valores de resistividade e de cargabilidade dos blocos do modelo, enquanto que os dados são os valores de resistividade e cargabilidade aparentes medidos. Sabe-se muito bem que para um mesmo conjunto de dados, há uma ampla variedade de modelos cujas resistividades/cargabilidades calculadas se aproximam, em algum grau, dos valores medidos. Os refinamentos adicionais também ajudam a estabilizar o processo de inversão. O programa *Zonge 2D Inversion for Interactive™ IP* usa um método iterativo que aprimora um modelo a partir de outro inicial, cujos valores de resistividade e cargabilidade aparentes sejam mais próximos aos valores medidos.

Um método interativo de inversão já bem conhecido, é o método *smoothness-constrain* (Groot-Hedlin e Constable, 1990), que busca reduzir as variações espaciais dos valores de resistividade/cargabilidade modelados. Esta abordagem é aceitável se as resistividades/cargabilidades reais variarem de forma suave e gradativa. Em alguns casos as características geológicas de um corpo podem ser homogêneas, porém seus contatos normalmente são abruptos em relação às unidades adjacentes. Para tais casos, uma fórmula de inversão que diminua as variações absolutas dos valores de resistividade/cargabilidade modelados pode levar a resultados significativamente melhores.

1.8.3.4 Aquisição, processamento e interpretação dos dados

Os dados de resistividade e polarização induzida foram adquiridos nas Linhas L1 a L4 com o arranjo dipolo-dipolo ($AB=MN=50$ m) e seis níveis de profundidade de investigação. Os equipamentos utilizados na aquisição dos dados geofísicos para o estudo do comportamento da cargabilidade e da resistividade na área incluem um sistema completo de polarização induzida e resistividade, da marca *Iris Instruments*, composto dos seguintes módulos: um transmissor de alta potência VIP3000W (FIGURA 1.27 A/B) alimentado por um gerador Honda EM5000S (FIGURA 1.27 C), e um receptor multicanal e espectral ELRECPRO (FIGURA 1.27 D).

O processamento básico dos dados geofísicos foi realizado no campo em ambiente computacional, mediante uso dos softwares *Oasis Montaj™* e *Zonge 2D Inversion for Interactive™ IP*, ambos da marca *Geosoft/Interpex*.

FIGURA 1.27 – EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES. A) SISTEMA TRANSMISSOR VIP3000W; B) TRANSMISSOR E BOBINAS CORRENTE; D) GERADOR EM5000S; E) SISTEMA RECEPTOR DE MARCA ELRECPRO





Fonte: o autor (2016).

1.9 DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS

O estudo das vibrações provocadas pelo atual tráfego de veículos foi realizado entre os km 216 e 218 da rodovia BR-135/BA, por meio da instrumentação da caverna conhecida como Buraco do Inferno e de pontos da superfície próximo ao eixo da estrada não pavimentada.

Segundo os critérios do CECAV, as fontes de vibração são classificadas da seguinte forma:

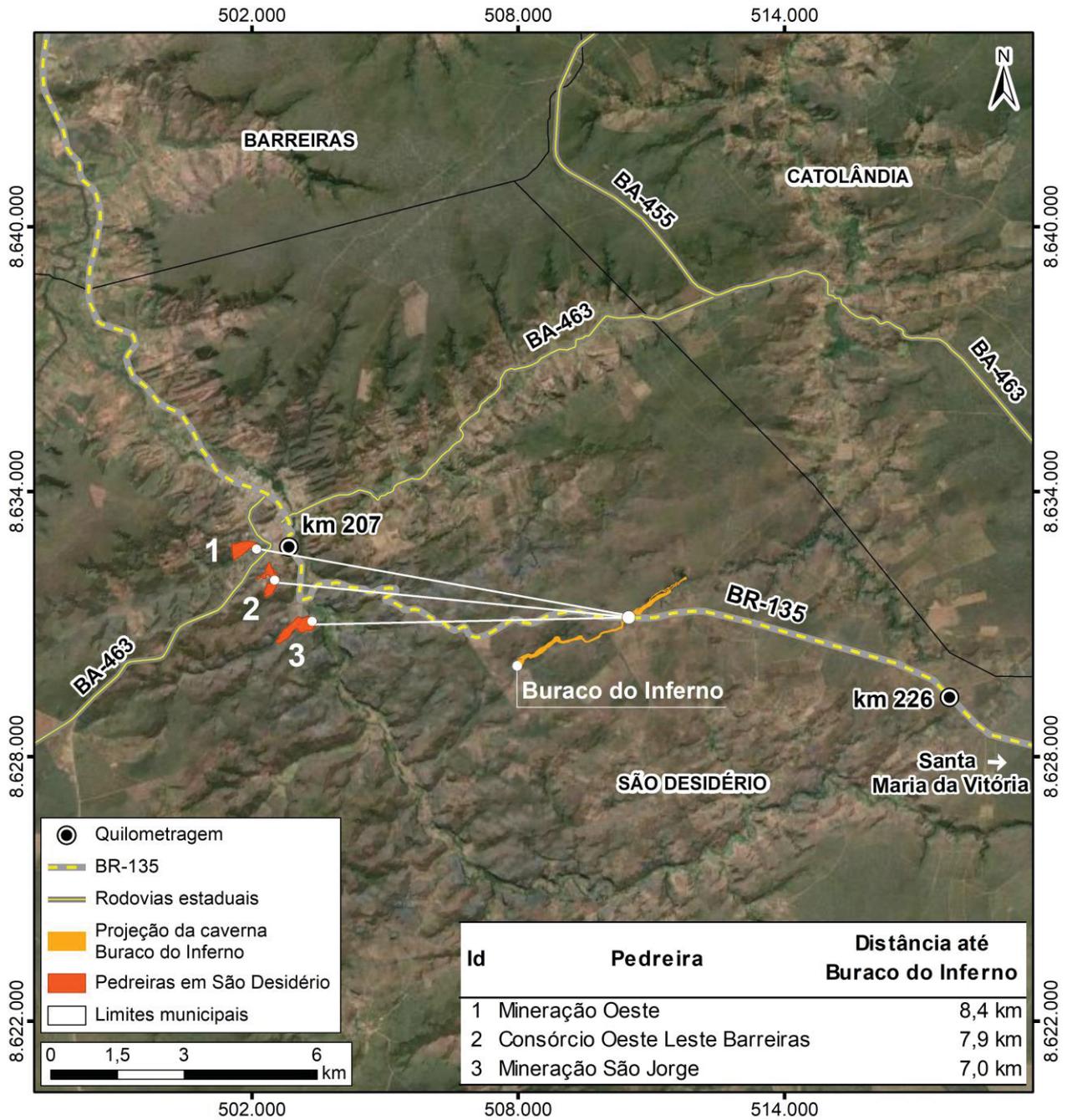
- vibração intermitente: caracterizada pela sucessão de eventos vibratórios de curta duração, como por exemplo quando da detonação de explosivos para desmonte de rocha por meio de micro retardos, da atividade de cravação de estacas por impacto e da atividade de compactação dinâmica por batimento;
- vibração transiente: quando a intensidade de vibração resulta de impacto súbito, seguido de um tempo de repouso relativamente prolongado, como por exemplo as vibrações decorrentes de atividades como tráfego de veículos pesados em vias de acesso rodoviário, da passagem de um comboio ferroviário, bem como as decorrentes do carregamento ou descarregamento de material;
- vibração contínua: quando a intensidade de vibração aproximadamente constante é mantida por um período de tempo significativo (são os casos, por exemplo, das vibrações originadas pelo funcionamento de maquinários pesados em geral tais como os existentes nos processos de britagem e de compactação de solos).

Por preservação do patrimônio espeleológico, seja qual for o tipo de contexto geológico, deve-se entender a manutenção de valores de velocidade de vibração de partícula de pico (máximo valor instantâneo da velocidade de uma partícula em um ponto durante um determinado intervalo de tempo) abaixo dos valores que possam causar qualquer tipo de dano irreversível às estruturas cársticas que o compõem.

Portanto, os resultados do monitoramento destinaram-se a estimar os eventuais impactos provocados pelo tráfego rodoviários sobre o patrimônio espeleológico existente na região, visando assegurar a sua preservação, durante a execução da obra.

Em relação às atividades desenvolvidas na região, destaca-se ainda a detonação de explosivos para desmonte de rocha que ocorre na região, devido às atividades das pedreiras comerciais próximas, sendo que não há estudos específicos sobre os impactos provenientes dos processos de exploração (FIGURA 1.28).

FIGURA 1.28 – LOCALIZAÇÃO DAS PEDREIRAS EM RELAÇÃO A INTERSEÇÃO DO BURACO DO INFERNO COM A BR-135/BA



Fonte: O autor (2020).

1.9.1 Aquisição dos dados

A instalação dos sismógrafos seguiu os procedimentos técnicos usuais em termos de método de fixação e nivelamento dos sensores. Respeitando-se as do piso de cada local de instalação, os geofones foram fixados com gesso (FIGURA 1.29 A) ou cravados no solo (FIGURA 1.29 B).

FIGURA 1.29 – INSTALAÇÃO DOS GEOFONES



Fonte: o Autor (2017).

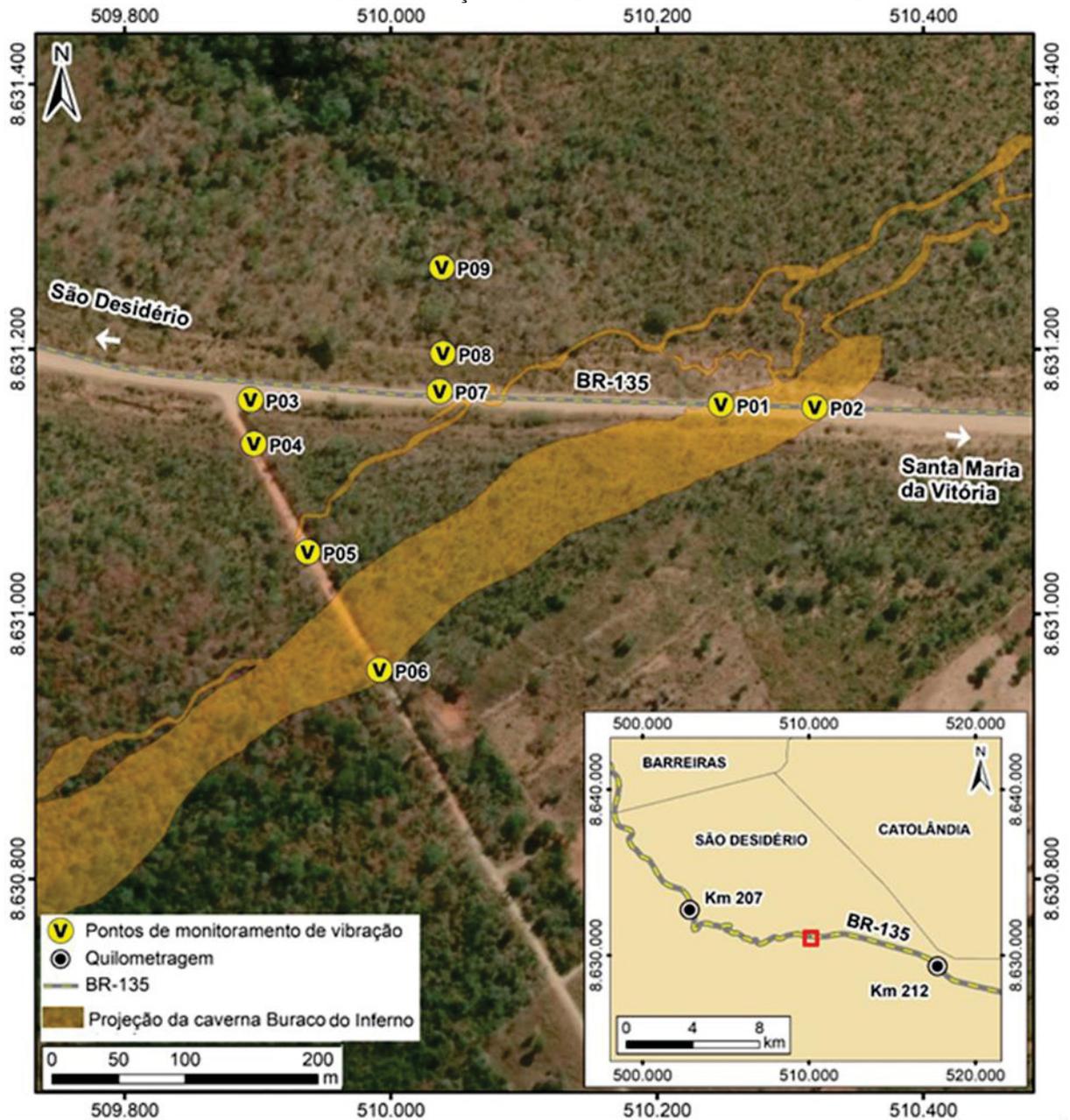
O monitoramento foi realizado em nove diferentes pontos (TABELA 1.5), sendo dois deles no interior da caverna Buraco do Inferno, na interseção da cavidade com a BR-135/BA, e os demais distribuídos quase que ortogonalmente à BR-135/BA, entre os km 217 e 2018 (FIGURA 1.30).

TABELA 1.5 – LOCALIZAÇÃO DOS LOCAIS MONITORADOS

LOCAL	DESCRIÇÃO	COORDENADAS	
		NORTE	LESTE
P01	Interior da caverna Buraco do Inferno	*	*
P02	Interior da caverna Buraco do Inferno	*	*
P03	Margem da rodovia	8631229	509939
P04	50 metros do eixo da rodovia	8631162	609944
P05	150 metros do eixo da rodovia	8631075	509993
P06	250 metros do eixo da rodovia	8630994	510044
P07	Margem da rodovia	8631212	510095
P08	50 metros do eixo da rodovia	8631256	510102
P09	100 metros do eixo da rodovia	8630221	508094

Fonte: O autor (2017).

FIGURA 1.30 – IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS DE MONITORAMENTO



Fonte: O autor (2020).

Para realização dos ensaios de efeitos das vibrações, os veículos que circulam naquele trecho da BR-135/BA foram classificados em: leves, médios e pesados (FIGURA 1.31).

FIGURA 1.31 – FONTE DE VIBRAÇÃO: A) VEÍCULO LEVE (CARRO DE PASSEIO); B) VEÍCULO MÉDIO (UTILITÁRIO/CAMINHONETE); C) VEÍCULO PESADO (CAMINHÃO)



Fonte: O autor (2017).

A passagem dos veículos foi registrada com horário, tipo e velocidade desenvolvida próxima do local de instalação dos sismógrafos (TABELA 1.6).

TABELA 1.6 – VELOCIDADES MEDIDAS PARA ANAÁLISE DE EFEITO DAS VIBRAÇÕES CAUSADAS POR TRÁFEGO DE VEÍCULOS

(continua)

DATA	HORA	VELOC. (km/h)	TIPO DE VEÍCULO	DATA	HORA	VELOC. (km/h)	TIPO DE VEÍCULO
02/10/17	10:13	29	passeio	03/10/17	14:05	40	utilitário
02/10/17	10:13	17	caminhão	03/10/17	14:06	38	caminhão
02/10/17	10:15	50	caminhão	03/10/17	14:07	38	caminhão
02/10/17	10:19	35	passeio	03/10/17	14:07	50	passeio
02/10/17	10:20	55	passeio	03/10/17	14:14	54	caminhão
02/10/17	10:20	32	caminhão	03/10/17	14:14	42	utilitário
02/10/17	10:21	42	moto	03/10/17	14:17	82	utilitário
02/10/17	10:21	35	passeio	03/10/17	14:19	77	passeio
02/10/17	10:28	30	caminhão	03/10/17	14:19	87	utilitário
02/10/17	10:30	85	passeio	03/10/17	14:23	57	moto
02/10/17	10:32	61	utilitário	03/10/17	14:26	71	passeio
02/10/17	10:40	-	moto	03/10/17	14:28	73	moto
02/10/17	10:40	28	van	03/10/17	14:42	63	utilitário
02/10/17	10:41	-	passeio	03/10/17	14:43	71	utilitário
02/10/17	10:47	71	utilitário	03/10/17	14:44	58	utilitário
02/10/17	10:49	77	utilitário	03/10/17	14:45	49	caminhão

TABELA 1.7 – VELOCIDADES MEDIDAS PARA ANÁLISE DE EFEITO DAS VIBRAÇÕES CAUSADAS POR TRÁFEGO DE VEÍCULOS (continuação)

DATA	HORA	VELOC. (km/h)	TIPO DE VEÍCULO	DATA	HORA	VELOC. (km/h)	TIPO DE VEÍCULO
02/10/17	10:49	70	utilitário	03/10/17	14:45	79	Utilitário
02/10/17	10:54	68	passaieiro	03/10/17	14:45	63	utilitário
02/10/17	10:54	41	passaieiro	03/10/17	14:46	97	utilitário
02/10/17	10:55	62	utilitário	03/10/17	14:47	51	utilitário
02/10/17	10:55	65	utilitário	03/10/17	14:48	55	moto
02/10/17	10:55	-	moto	03/10/17	14:49	59	passaieiro
02/10/17	10:57	40	utilitário	03/10/17	14:50	58	utilitário
02/10/17	10:59	40	utilitário	03/10/17	14:50	51	utilitário
02/10/17	11:01	28	passaieiro	03/10/17	14:51	35	passaieiro
02/10/17	11:01	21	caminhão	03/10/17	14:52	61	passaieiro
02/10/17	11:02	42	passaieiro	03/10/17	14:53	55	passaieiro
02/10/17	11:03	48	utilitário	03/10/17	14:54	18	utilitário
02/10/17	11:06	49	utilitário	03/10/17	14:54	28	caminhão
02/10/17	11:06	69	utilitário	03/10/17	14:55	41	utilitário
02/10/17	11:09	66	utilitário	03/10/17	14:56	63	utilitário
02/10/17	11:10	35	passaieiro	03/10/17	14:57	51	caminhão
02/10/17	11:10	68	utilitário	03/10/17	14:58	31	utilitário
02/10/17	11:12	75	utilitário	03/10/17	14:59	31	passaieiro
02/10/17	11:14	75	passaieiro	03/10/17	15:00	49	utilitário
02/10/17	11:15	61	utilitário	03/10/17	15:00	46	utilitário
02/10/17	11:17	76	passaieiro	03/10/17	15:01	25	van
02/10/17	11:18	92	passaieiro	03/10/17	15:03	10	utilitário
02/10/17	11:18	52	moto	03/10/17	15:04	68	utilitário
02/10/17	11:19	64	utilitário	03/10/17	15:05	42	utilitário
02/10/17	11:20	66	utilitário	03/10/17	15:05	58	passaieiro
02/10/17	11:20	68	passaieiro	03/10/17	15:06	61	utilitário
02/10/17	11:21	73	utilitário	03/10/17	15:06	61	utilitário
02/10/17	11:22	36	passaieiro	03/10/17	15:07	58	utilitário
02/10/17	11:23	66	utilitário	03/10/17	15:08	44	passaieiro
02/10/17	11:24	69	utilitário	03/10/17	15:08	63	utilitário
02/10/17	11:26	34	passaieiro	03/10/17	15:09	44	utilitário
02/10/17	11:27	68	utilitário	03/10/17	15:10	63	utilitário
02/10/17	11:28	66	utilitário	03/10/17	15:11	48	utilitário
02/10/17	11:30	75	utilitário	03/10/17	15:12	32	utilitário
02/10/17	11:31	67	passaieiro	03/10/17	15:13	44	utilitário
02/10/17	11:31	68	utilitário	03/10/17	15:13	79	passaieiro
02/10/17	11:32	66	utilitário	03/10/17	15:14	65	utilitário
02/10/17	11:36	69	utilitário	03/10/17	15:15	18	caminhão
02/10/17	11:37	69	utilitário	03/10/17	15:15	34	utilitário
02/10/17	11:39	77	utilitário	03/10/17	15:17	52	utilitário

TABELA 1.8 – VELOCIDADES MEDIDAS PARA ANÁLISE DE EFEITO DAS VIBRAÇÕES CAUSADAS POR TRÁFEGO DE VEÍCULOS (conclusão)

DATA	HORA	VELOC. (km/h)	TIPO DE VEÍCULO	DATA	HORA	VELOC. (km/h)	TIPO DE VEÍCULO
02/10/17	11:40	70	utilitário	03/10/17	15:18	30	Utilitário
02/10/17	11:43	69	utilitário	03/10/17	15:19	49	caminhão
02/10/17	11:44	41	passeio	03/10/17	15:20	40	utilitário
02/10/17	11:44	62	utilitário	03/10/17	15:21	60	utilitário
02/10/17	11:47	74	utilitário	03/10/17	15:22	31	utilitário
02/10/17	11:48	73	utilitário	03/10/17	15:23	57	utilitário
02/10/17	11:51	68	utilitário	03/10/17	15:24	41	utilitário
02/10/17	11:52	68	utilitário	03/10/17	15:25	60	passeio
02/10/17	11:54	72	utilitário	03/10/17	15:25	47	utilitário
02/10/17	11:55	70	utilitário	03/10/17	15:26	60	passeio
02/10/17	11:57	76	utilitário	03/10/17	15:27	37	caminhão
02/10/17	11:58	63	passeio	03/10/17	15:27	29	caminhão
03/10/17	13:55	-	passeio	03/10/17	15:28	38	utilitário
03/10/17	13:57	40	moto	03/10/17	15:29	55	utilitário
03/10/17	13:57	43	passeio	03/10/17	15:29	66	utilitário
03/10/17	14:00	66	moto	03/10/17	15:30	66	utilitário
03/10/17	14:01	80	passeio	03/10/17	15:31	43	caminhão
03/10/17	14:01	70	moto	03/10/17	15:32	54	van
03/10/17	14:03	66	passeio	03/10/17	15:32	57	passeio
03/10/17	14:05	67	utilitário	03/10/17	15:33	82	passeio

Fonte: O autor (2017).

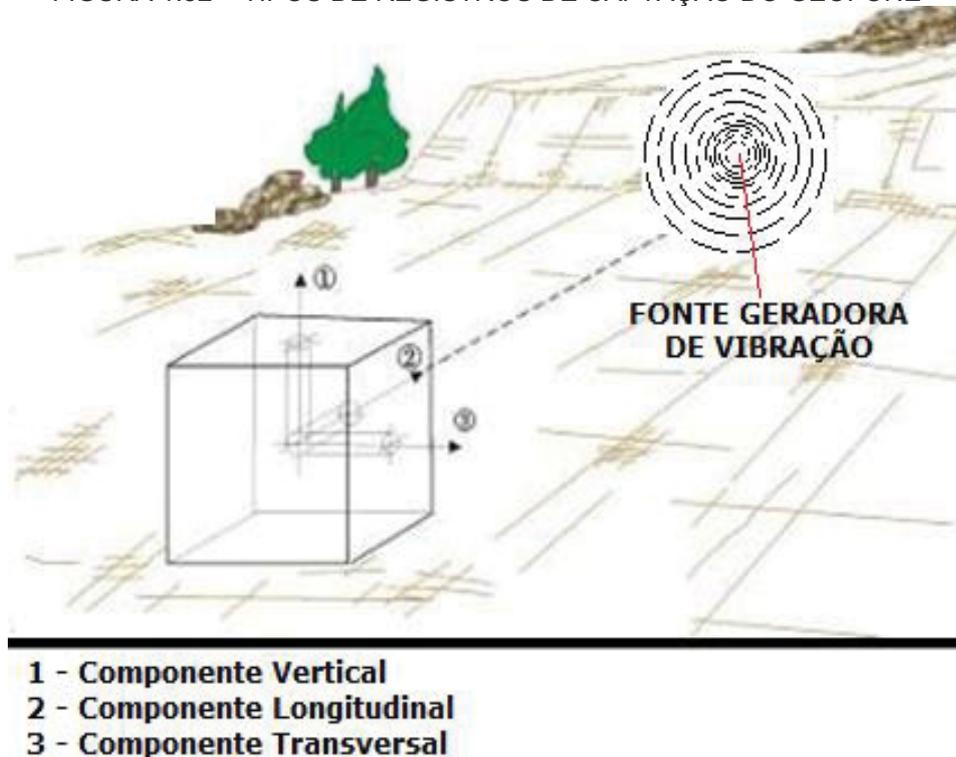
Os sismógrafos de engenharia utilizados foram preparados para medições de maneira contínua, ou seja, configurados no modo “histograma” e instalados a partir de um ponto localizado o mais próximo possível do leito atual da rodovia (2 m de distância da rodovia) e a intervalos de 50 e 100 m, a fim de avaliar o fator de atenuação da onda vibratória, numa faixa de 250 m da rodovia, área teoricamente considerada como passível de registrar algum sinal de vibração que pudesse atingir uma cavidade que se localizasse nesta faixa.

No modo “histograma” os resultados são apresentados graficamente por barras indicando as velocidades de partícula, registrados a cada minuto.

Foram registradas as intensidades das velocidades das componentes ortogonais da velocidade de vibração de partícula; vertical ($V_{(1)}$), longitudinal ($L_{(2)}$) e transversal ($T_{(3)}$) (FIGURA 1.32). A direção da componente longitudinal é definida pelos pontos de geração da vibração e de captação (sismógrafo) enquanto que a direção da componente transversal é definida como a direção perpendicular à

direção longitudinal no plano horizontal e a direção da componente vertical é aquela perpendicular ao plano definido pelas demais.

FIGURA 1.32 – TIPOS DE REGISTROS DE CAPTAÇÃO DO GEOFONE



Fonte: O autor (2018).

Os monitoramentos foram efetuados utilizando-se sismógrafos de engenharia da marca Geosonics®, modelo SSU 3000 EZ+, com geofone composto de três transdutores posicionados tri-ortogonalmente (L, T e V), capaz de realizar medições de velocidade de vibração de partícula, de até 130 mm/s em sua versão standard e de até 250 mm/s ou 500 mm/s, na faixa de frequência de 2 Hz a 250 Hz. As coordenadas geográficas de cada local foram obtidas utilizando-se o aplicativo *gps essentials* para *smartphone*.

Para balizar as interpretações dos resultados utilizou-se o critério estabelecido em Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico – Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais, do CECAV (2016), que determina os seguintes limites de vibração, em função do tipo de atividade geradora (longa, média ou curta duração), a saber: vibração intermitente, 5,0 mm/s; vibração transiente, 3,0 mm/s e vibração contínua, 2,5 mm/s.

1.10 LEVANTAMENTO POR SONDAgens E ENSAIOS

Os resultados geofísicos foram validados a partir do uso combinado dos métodos. Mesmo que feitas com todas as precauções, as sondagens poderiam afetar o maciço rochoso, favorecendo os processos erosivos podendo, inclusive, fragilizar diretamente o patrimônio espeleológico (NASCIMENTO NETO *et al*, *no prelo*).

Na análise geotécnica de tensões sobre a cavidade Buraco do Inferno, foram utilizados, para a determinação da resistência à compressão e módulo estático das rochas carbonáticas da Formação São Desidério, ensaios tecnológicos feitos pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Instituto Lactec, relatório 2794/2014-R1, para obtenção do Coeficiente de Poisson e Módulo de Elasticidade.

Os metacalcários foram caracterizados no LAMIR/UFPR por análise de seções delgadas, por petrografia microscópica de luz transmitida, com composição mineralógica estimada visualmente. Para tanto, utilizou-se um microscópio petrográfico *Carl Zeiss*, modelo *AIXIO Imager A2m*.

Os valores de coeficiente de *Poisson* e módulo de elasticidade dos arenitos utilizados nesta pesquisa foram obtidos em DAS (2007), TABELA 1.9.

TABELA 1.9 – MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) E COEFICIENTE DE *POISSON*.

Tipo de solo	Módulo de Elasticidade (MPa)
Argila mole	1,8 a 3,5
Argila dura	6 a 14
Areia fofa	10 a 28
Areia compacta	35 a 70
Tipo de solo	Coeficiente de Poisson
Areia fofa	0,20 a 0,40
Areia média	0,25 a 0,40
Areia compacta	0,30 a 0,45
Areia com silte	0,20 a 0,40
Argila mole	0,15 a 0,25
Argila média	0,20 a 0,50

FONTE: DAS (2007).

Os parâmetros atribuídos aos arenitos da região foram equivalentes aos de areia compacta, ou seja, módulo de elasticidade variando entre 35 e 70 MPa e coeficiente de *Poisson* variando entre 0,30 e 0,45 conforme DAS (2007).

1.10.1 Análises geotécnicas

A distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas em maciços com cavidades subterrâneas depende de vários fatores, dentre os quais se destacam:

- a forma e a posição da cavidade, sua profundidade e seu preenchimento;
- a deformabilidade do maciço que, de forma conservativa, pode ser analisado como um meio elástico, portanto, representada pelo Módulo de Deformabilidade (E) e do coeficiente de Poisson (ν); e
- a intensidade da sobrecarga aplicada na superfície, para verificar os efeitos da repetição de cargas e da eventual propagação dos efeitos decorrentes de vibrações que possam ocorrer.

Dependendo das dimensões e da posição das cavidades os efeitos da sobrecarga, muitas vezes, são dissipados no maciço sem provocar qualquer deformação ou desenvolvimento de tensões sobre estas. Isto pode ocorrer, por exemplo, por uma redistribuição das tensões internas do maciço, de sorte que os acréscimos de tensão podem ser infinitesimais em relação às tensões geostáticas existentes.

Nos maciços rochosos, as tensões e as deformações induzidas decrescem rapidamente com o aumento da profundidade, permitindo, em função da deformabilidade do maciço, que se determine uma profundidade limite, a partir da qual praticamente não ocorre mais nenhum risco de acréscimo destas.

É importante salientar que, em se tratando de maciços cársticos onde as cavidades existentes formaram-se em decorrência de dissolução gradativa das rochas calcáreas, causada pelo fluxo de águas superficiais e subterrâneas, ao longo de centenas a milhares de anos. Como consequência, as eventuais redistribuições de tensões internas ao maciço já ocorreram e pode-se dizer que na escala temporal o maciço encontra-se em equilíbrio geostático.

Situação diferenciada seria aquela causada pela abertura momentânea de uma cavidade, como no caso da construção de um túnel internamente a um maciço, onde, de forma abrupta, poderiam ocorrer redistribuições das tensões geostáticas e as deformações induzidas. Este comentário é importante para justificar-se que, ante a inexistência de métodos de cálculo para avaliação de estabilidade de cavernas, utilizam-se os métodos desenvolvidas para o cálculo de túneis que, via de regra, conduzem a resultados de redistribuição de tensões e de deformações muito maiores.

Assim, com os dados obtidos através do uso conjunto das técnicas de investigação geofísica, que permitiram determinar a posição da cavidade Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério sob o eixo da rodovia BR-135/BA, bem como suas características geométricas, dimensões, profundidade, espessura dos estratos sedimentares, descontinuidades e identificação de contatos geológicos, foram aplicados métodos geológico-geotécnicos para calcular segurança estrutural do maciço na seção onde a cavidade intercepta perpendicularmente, em profundidade, a projeção da implantação da rodovia na superfície.

1.10.2 Método para avaliação de tensões em cavidades (túneis)

Diversos autores desenvolveram métodos já consagrados para a avaliação de tensões e deformações decorrentes da escavação de túneis, em maciços de solos e/ou rochas, sejam estes homogêneos ou heterogêneos, ante ao não conhecimento de teorias de cálculo para avaliação de estabilidade de cavernas. Destacam-se aqueles que permitem a análise das condições de equilíbrio no estado limite (ou de ruptura), tais como os de Bierbaumer (1813) e Terzagui (1949), que realizam uma avaliação empírica das tensões máximas geradas causadas por uma carga pontual, aplicada em um semiespaço infinitamente grande, em qualquer ponto de um meio homogêneo, elástico e isotrópico.

De forma resumida, essas teorias de análise das condições de equilíbrio permitem determinar o coeficiente de segurança (FS) da cavidade, definido pela relação entre a resistência ou capacidade de carga (q_a) dos maciços e as tensões atuantes (q_z) na profundidade (z), em qualquer ponto do maciço. Em análises conservadoras, são considerados como suficientes para a avaliação da estabilidade

de maciços rochosos em relação ao risco de ruptura, e os valores mínimos do coeficiente de segurança superiores a 3,0 ($FS > 3,0$). Neste sentido, têm-se duas variáveis: capacidade de carga e o valor de tensão atuante.

Para a definição da capacidade de carga (q_a) do tipo de material em questão, identificado pela análise petrográfica como metacalcário, tem-se os valores apresentados por diversos autores: Berberian (1996), 12 kgf/cm²; Milton Vargas (1982), 70 kgf/cm²; Parry (1978), 12 kgf/cm²; Norma DIN 1054 (1997), 15 kgf/cm² e NBR 6122 (ABNT, 2010), 15 kgf/cm². Na análise deste estudo foi considerado, então, o valor médio de 27,8 kgf/cm² e como valor mínimo 12 kgf/cm².

O valor da tensão atuante (q_z), na profundidade “z”, depende da geometria de distribuição da sobrecarga e da posição da cavidade, bem como do método proposto por cada autor, onde considera-se o estado de equilíbrio geostático existente e as tensões induzidas pelo acréscimo de carga. Portanto, fez-se mister a escolha de um método que permitisse a avaliação do acréscimo de tensões em qualquer profundidade, em decorrência de uma sobrecarga na superfície. Assim sendo, a determinação do coeficiente de segurança (FS) será: $FS = (q_a)/(q_z)$.

Dentre os métodos de análise de acréscimo de tensões, fundamentados em uma análise elástica, o que permite uma melhor compreensão do fenômeno, para qualquer ponto inserido na área de influência do maciço, é o método desenvolvido por Boussinesq (1885), que desenvolveu as equações para cálculo dos acréscimos de tensões efetivas verticais, radiais e tangenciais, causadas pela aplicação de uma carga pontual agindo perpendicularmente na superfície do maciço.

1.10.3 Cálculo da capacidade de suporte do solo com uso de *software*

Para análise preliminar da capacidade de suporte do substrato da área de estudo foi utilizado o software *GeoStudio SIGMA/W*, que gerou resultados a partir de elementos finitos planos. Permitiu a análise de tensão versus deformação em condições de estado plano e axissimétrico, ou seja, em estado plano e com simetria em relação ao eixo central, conforme método utilizado por Franco (2010). O método aplicado foi uma análise de distribuição de tensões no solo no regime elástico linear com carregamento estático.

O método dos elementos finitos é uma ferramenta de análise de problemas que pode ser utilizado em diversas áreas, cujo objetivo é criar um modelo de sistema com um número finito de elementos mais simples que o original e obter uma aproximação a partir de vários elementos agrupados, dessa forma os sistemas mais complexos e/ou irregulares podem ser resolvidos de forma automática por intermédio de computadores (TAVARES, 1998). Considerou-se o sistema global como equivalente a um agrupamento de elementos conectados por pontos comuns designados por nós cujos deslocamentos são compatíveis e as forças internas estão em equilíbrio (TAVARES, 1998), sendo assim, com as partes em equilíbrio, o todo também está.

Para realização das simulações, existem alguns dados de alimentação do *software* que são necessários. O primeiro dado de entrada é o perfil do maciço, neste caso, as camadas de arenito e calcário, a posição da cavidade, seguidos do tipo de análise a ser feita. Devido a escala do levantamento realizado, não foram consideradas possíveis descontinuidades de dissolução no contato. Neste estudo foi realizada análise elástica-linear. O segundo dado de entrada é a informação das regiões a analisar em *Draw Regions*. Não houveram amostragens sistêmicas dos diferentes tipos litológicos e dos diferentes graus de alteração do maciço. Foram utilizados os dados obtidos durante os trabalhos de obtenção de dados pelos levantamentos geofísicos. Depois são adicionados em *Draw Materials* os materiais, ou seja, os parâmetros geotécnicos (coeficiente de *Poisson* e módulo de elasticidade) de cada região estabelecida anteriormente.

Uma vez estabelecido o *material* de cada região, o *software* gerou automaticamente uma malha de elementos finitos. Essa malha pode ser alterada pelo usuário em âmbito global ou local. Por exemplo: se for desejável que uma parte do modelo apresente malha mais refinada do que a outra é possível alterar a disposição dos nós localmente, bom para modelos muito complexos e com muitos nós que levariam muito tempo para gerar resultado se tivessem essa malha mais refinada no modelo todo. A malha que foi usada nesse estudo é quadrada, com um nó a cada metro, totalizando 27.522 nós e 27.373 elementos.

A próxima etapa foi a de determinar as condições de contorno em *Boundary Conditions*, as quais foram determinadas como apoios fixos na direção horizontal nas laterais da malha e apoios fixos na direção horizontal e vertical na base. As dimensões foram escolhidas para que essas premissas de deslocamento iguais a

zero fossem o mais próximo da realidade, por isso, adotou-se a extensão horizontal como 200 m e a altura como 140 m. Em *Boundary Conditions* também se determina o carregamento a ser aplicado e o posicionamento é feito pelo usuário.

1.10.4 Distribuição de tensões na rodovia sobre a caverna Buraco do Inferno

Adotou-se como carregamento máximo na rodovia a soma da carga do aterro com a carga do equipamento mais pesado utilizado durante a etapa de instalação da rodovia, que é o rolo compactador de pneus, modelo CW34 da Caterpillar, um equipamento de 27 toneladas distribuídas em 8 rodas.

Para estimar o carregamento provindo do aterro somado ao pavimento, usou-se argila siltosa com granulação angular compacta, uma vez que apresenta índice de vazios e teor de umidade natural baixos, características essas que são necessárias para estabilidade do aterro. O resultado da soma dos pesos específicos do solo de aterro e pavimento foi estimado em 20 kN/m³, conforme indica TABELA 1.10.

TABELA 1.10 – VALORES DE ÍNDICES DE VAZIOS, TEOR DE UMIDADE E PESO ESPECÍFICO SECO DE SOLOS TÍPIDO EM ESTADO NATURAL.

Tipo de Solo	Índice de Vazios	Teor de Umidade Natural em Estado Saturado (%)	Peso Específico Seco (kN/m ³)
Areia uniformemente fofa	0,8	30	14,5
Areia uniformemente compacta	0,45	16	18
Areia siltosa com granulação angular fofa	0,65	25	16
Areia siltosa com granulação angular compacta	0,4	15	19
Argila rija	0,6	21	17
Argila mole	0,9 a 1,4	30 a 50	11,5 a 14,5
Loesse (sedimentos eólicos férteis e cor amarela)	0,9	25	13,5
Argila orgânica mole	2,5 a 3,2	90 a 120	6 a 8
Till glacial (solo erudido de geleira)	0,3	10	21

Fonte: DAS (2017).

Utilizando dados do projeto do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, foi considerado que o aterro terá altura de um metro e taludes laterais com inclinação de 45° (V:H = 1:1). O cálculo da tensão provocada pelo aterro é dado

pela multiplicação do peso específico pelo volume do aterro (usou-se profundidade unitária) dividido pela área da base do aterro:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{aterro}} &= \frac{20\text{kN}}{\text{m}^3} * \frac{(12+10)*1}{2} \text{m}^2 * 1\text{m} = 220\text{kN} \\ &= \frac{220\text{kN}}{12 * 1\text{m}^2} = 18,33 \text{kPa}\end{aligned}\tag{1.2}$$

No que diz respeito do carregamento devido ao rolo compactador de pneus (FIGURA 1.33), a carga adicional provocada foi calculada com base em seu peso e área de projeção do equipamento.

FIGURA 1.33 – ROLO COMPACTADOR DE PNEUS MODELO CW34.



Fonte: Catálogo de produtos Caterpillar (2019).

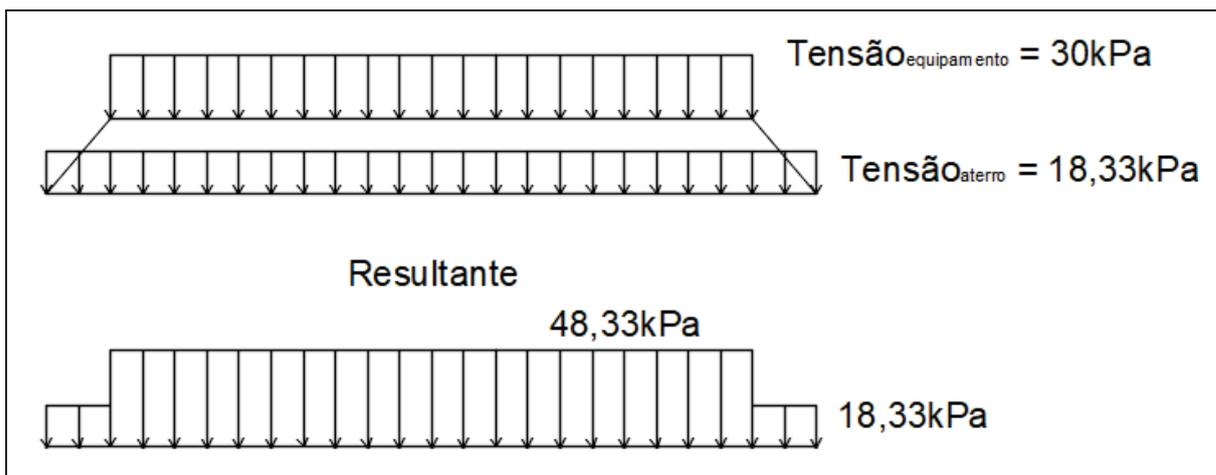
A massa e área de projeção do equipamento variam de acordo com o fabricante. O equipamento usado como base para análise de tensões apresenta massa de 27.000 kg e dimensões de 5,35 m de comprimento e 2,16 m de largura, assim, o cálculo da tensão é exposto na equação:

$$Tensão = \frac{27000 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{5,35 * 2,16 \text{ m}^2} * 10^{-3} = 22,92 \text{ kPa} \quad (1.3)$$

Devido a diferenças de massa e dimensões dos equipamentos de acordo com os fabricantes e ao uso do equipamento em fases de recapeamento asfáltico, adotou-se o carregamento final como sendo de 30 kPa de forma distribuída ao longo de toda região a ser asfaltada, transversalmente, a rodovia.

O perfil de carregamento calculado apresentado na FIGURA 1.34. Embora o equipamento não atue simultaneamente em toda plataforma, aplicou-se tensão provinda do equipamento em toda extensão de 10 m, como forma de considerar todas as possíveis movimentações do equipamento na rodovia.

FIGURA 1.34 – ESQUEMA DE CARREGAMENTO NA RODOVIA: TENSÃO PROVENIENTE DO ATERRO (QUE JÁ INCLUI PAVIMENTAÇÃO) E DO EQUIPAMENTO DE COMPACTAÇÃO.



Fonte: Zampieri (2017).

2 CONTEXTO GEOLÓGICO

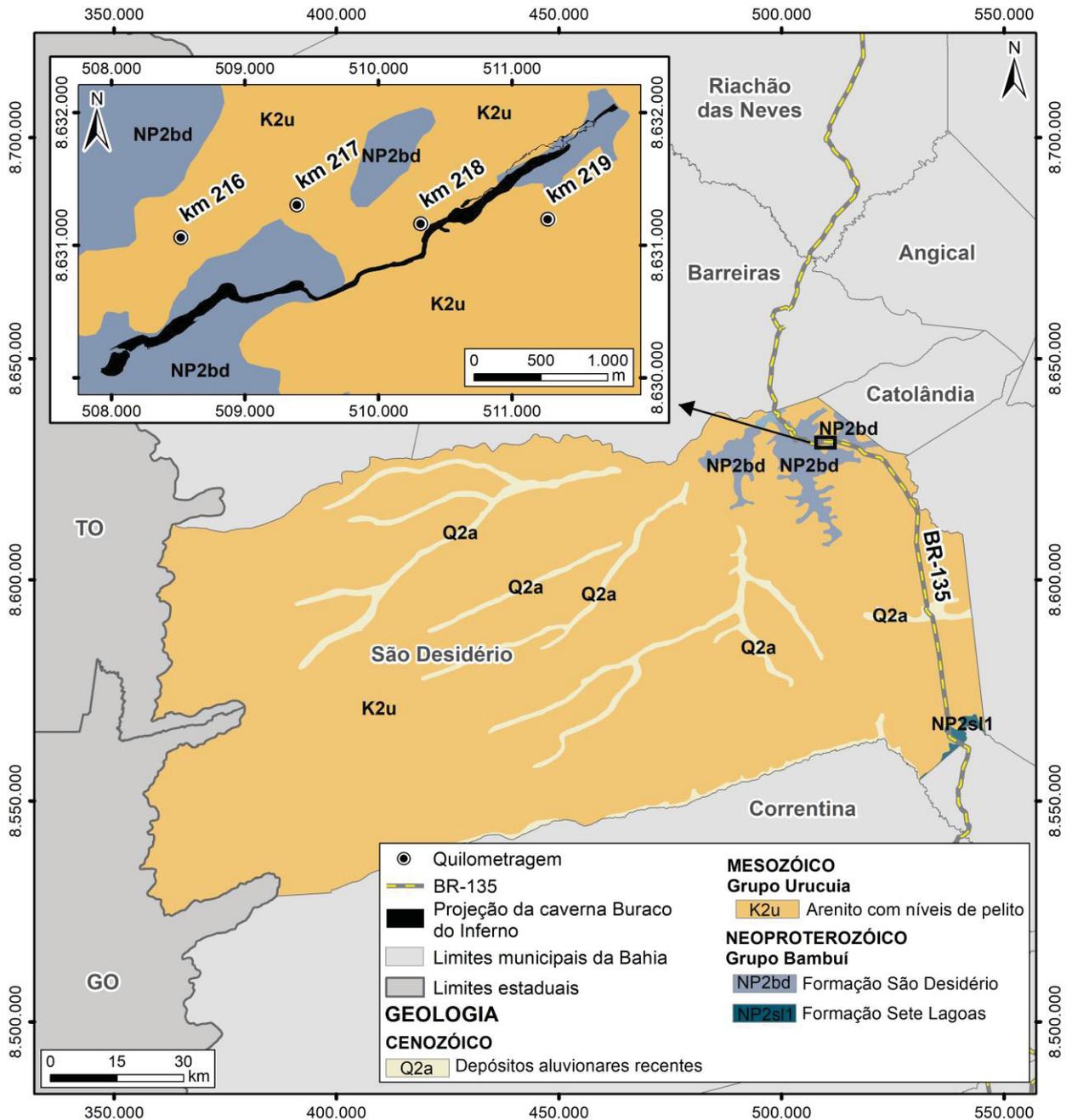
O contexto geológico da área foi baseado em informações da carta geológica da CPRM (2010). O mapa geológico local foi elaborado com dados vetoriais secundários disponíveis no banco de dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2004). Ao mapa geológico assim elaborado foram feitas verificações e complementadas com dados litológicos de campo, com descrição das principais características composicionais, texturas e estruturais das unidades.

A caracterização petrográfica microscópica da principal unidade calcária foi realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas – Lamir/UFPR (certificado nº 2014-1014), a partir de 5 amostras coletadas em diferentes locais na área de estudo.

Em termos geológicos, a área de estudo faz pertencer ao setor noroeste da província geológica denominada Cráton São Francisco, uma porção espessa e estável da crosta continental, que constitui o substrato de parte dos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Piauí, Sergipe, Pernambuco e Tocantins.

Na região essa grande unidade é representada pelas rochas metassedimentares da Bacia do São Francisco Grupo Bambuí/Formação São Desidério), sobrepostas por coberturas de rochas sedimentares da Bacia Sanfranciscana (Grupo Urucuia/Formação Urucuia, FIGURA 2.1). Em menor área ocorrem coberturas sedimentares cenozoicas constituídas pelos sedimentos depositados pelos atuais cursos fluviais e crostas lateríticas desenvolvidas pelo intemperismo sobre os chapadões.

FIGURA 2.1 - CONTEXTO GEOLÓGICO DO TRECHO RODVIÁRIO, SOBRE ROCHAS METACALCÁRIAS DO GRUPO BAMBUÍ E ARENITOS DO GRUPO URUCUIA.



Fonte: Adaptado de CPRM (2004).

2.1 BACIA DO SÃO FRANCISCO

A Bacia do São Francisco é uma estrutura intracratônica predominantemente formada por rochas metassedimentares proterozóicas (2,5 - 0,5 bilhões de anos), originalmente depositadas em ambiente marinho, sobre o embasamento metamórfico, de idade superior a 1,8 bilhões de anos, e encoberta por rochas fanerozóicas (< 541 milhões de anos - hoje) da Bacia Sanfranciscana.

Ao contrário da parte central da Bacia Sanfranciscana, as suas bordas se encontram deformadas, em faixas de deformação que contornam o cráton, desenvolvidas durante a formação do supercontinente Gondwana (660 - 530 milhões de anos), (Zalán; Silva, 2007).

Segundo Egydio-Silva *et al.* (1989) no oeste da Bahia as rochas metassedimentares Grupo Bambuí situam-se em região de transição de domínios pericratônico e cratônico. O grupo compreende, da base para o topo, as formações São Desidério, Serra da Mamona e Riachão das Neves. As rochas atingiram grau de metamorfismo incipiente a fraco. Em termos estruturais, exibem dobramentos de eixos orientados nordeste-sudeste próximo ao domínio pericratônico (FIGURA 2.2), enquanto no domínio cratônico interior as unidades apresentam acamamento sub-horizontal.

FIGURA 2.2 – DOBRAS EM ROCHAS DA FM. SÃO DESIDÉRIO, NO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO (A) E FM. SERRA DA MAMONA, NO MUNICÍPIO DE CATOLÂNDIA (B), EXEMPLOS DE DEFORMAÇÕES TECTÔNICAS DO DOMÍNIO PERICRATÔNICO.



Localização UTM 23S: a) 502410/8632901; b) 514496/8638995
 Fonte: ITTI/UFPR (2019).

A Formação São Desidério é constituída por metacalcários cinza escuros com intercalações de metamargas e metasiltitos, (EGYDIO-SILVA, 1987), aflorantes ao longo da margem direita do rio São Desidério, próximo a cidade homônima. Seu embasamento pode ser observado na região de Correntina (BA), e consiste de rochas metamórficas de alto grau, gnáissico-migmatíticas. Já o contato superior se dá de modo gradativo com a Formação Serra da Mamona, unidade sobrejacente.

Descrita na região homônima, norte do município de São Desidério, a Formação Serra da Mamona é marcada pela alternância de metacarbonatos e metapelitos. A unidade é constituída por metamargas, metarenitos finos, metasiltitos esverdeados, metacalcários negros e ardósias micáceas. Essa unidade tem

espessura estimada de 3.000 m, sendo repetida tectonicamente, ao norte de Riachão das Neves, por falhas de empurrão sobre a unidade superior. O contato inferior gradual com a Formação São Desidério é caracterizado pelo espessamento das camadas pelíticas (ardósia e metasiltito) e psamíticas (metarenito fino) e intercalações menos frequentes de rochas carbonáticas. O contato superior da unidade também é gradativo com o aumento da granulação dos grãos e quantidade de feldspato (EGYDIO-SILVA, 1987).

A Formação Riachão das Neves foi descrita no cruzamento da rodovia BR135/BA com a escarpa da Serra do Riachão, onde foi caracterizada pelo conjunto de matarcóseos intercalados por metasiltitos micáceos, metarenitos finos feldspáticos e metacalcários negros. A unidade tem espessura estimada de 3.000 metros. O contato superior se dá por contato angular e erosivo com as rochas da Bacia Sanfranciscana (EGYDIO-SILVA, 1987).

A Formação São Desidério é a única unidade litoestratigráfica encontrada na área diretamente afetada pela construção da rodovia, aflorando em camadas contínuas que frequentemente formam paredões (FIGURA 2.3 A) e pequenos morros, que tem como característica superficial o desenvolvimento de campos de lapiás (FIGURA 2.3 B). Sobre essa unidade é encontrada uma espessa camada de cambissolo areno-argiloso desenvolvido sobre o material proveniente do intemperismo das rochas do Grupo Urucuia.

FIGURA 2.3 – ASPECTOS COMUNS DA FM. SÃO DESIDÉRIO A) MORRO COM FEIÇÕES CÁRSTICAS; B) FEIÇÕES DENOMINADAS CAMPO DE LAPIÁS. LOCAL: RODOVIA BR 135/BA NAS IMEDIAÇÕES DO KM 207.



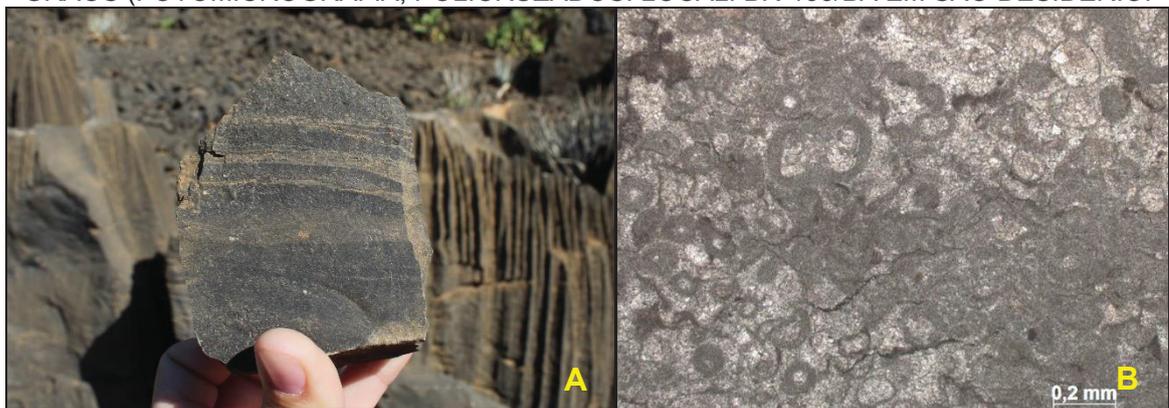
Localização UTM 23S: a) 503170/8631342; b) 505518/8631312. Fonte: ITTI/UFPR, (2019).

As rochas da Fm. São Desidério aflorantes na área de estudo são metacalcários oolíticos calcíticos, de granulação areia fina, cor cinza. Ocorrem em

camadas subhorizontais de espessura média centimétrica. Os estratos apresentam predomínio de mergulhos suaves, de até 10°, predominantemente para sudoeste, seguindo a estruturação da Faixa Rio Preto.

Como estruturas sedimentares comuns, exibem laminação plano-paralelas e marcas onduladas, evidenciadas por diferença de cores entre as laminas (FIGURA 2.4 A). Em escala microscópica os metarenitos calcíticos apresentam-se compostos por oóides e oncóides, de cor cinza escuro, com acimento carbonático micrítico de cor cinza clara (FIGURA 2.4 B). Mais precisamente, os metacalcários podem ainda ser nominados de metacalcários oolíticos, ou mármorees oolíticos.

FIGURA 2.4 – APARÊNCIA DOS METACALCÁRIOS OOLÍTICOS DA FM. SÃO DESIDÉRIO. A) LAMINAÇÃO FREQUENTEMENTE OBSERVADA EM ESCALA DE AFLORAMENTO; B) COMPOSIÇÃO OOLÍTICA DO ARCABOUÇO E CIMENTAÇÃO DE CALCITA ESPÁTICA, ENTRE OS GRÃOS (FOTOMICROGRAFIA, POL.CRUZADOS. LOCAL: BR-135/BA EM SÃO DESIDÉRIO.

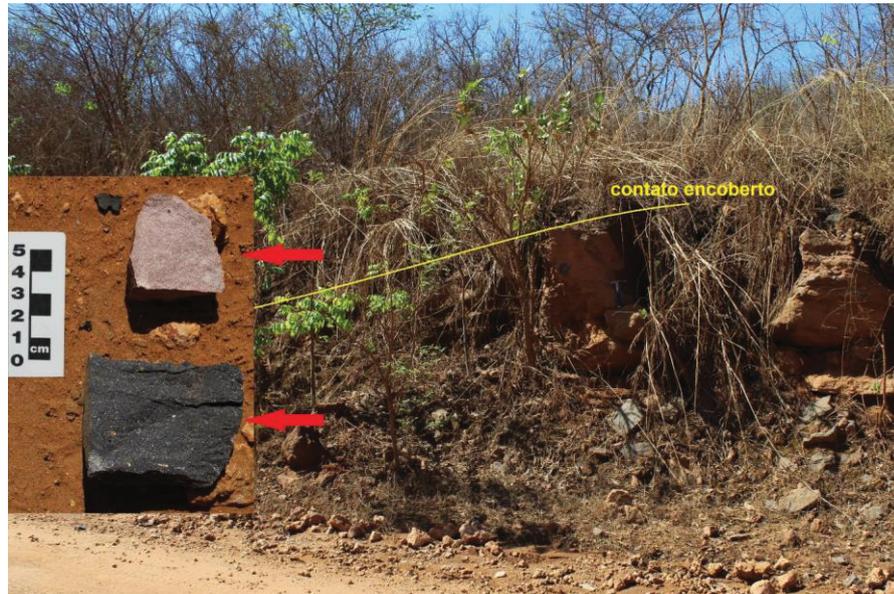


Fonte: a) ITTI/UFPR (2014); b) Lamir (2014)

2.2 BACIA SANFRANCISCANA

A Bacia Sanfranciscana é representada na região por arenitos do Grupo Uruçuia, o qual tem sua base em discordância erosiva sobre as rochas do Grupo Bambuí (FIGURA 2.5). A deposição dessa unidade, de espessura máxima de 200 m, sucedeu-se durante o Neocretáceo (66-100 milhões de anos) em um ambiente continental caracterizado por depósitos de dunas eólicas na base e, para o topo da unidade, uma maior influência fluvial com depósitos de rios entrelaçados (CAMPOS; DARDENNE, 1997).

FIGURA 2.5 – CONTATO ENTRE OS GRUPOS URUCUIA (TOPO) E BAMBUI, MAL EXPOSTO, COM AMOSTRAS DE ROCHAS FRECAS DAS UNIDADES. LOCAL: KM 210, BR-135/BA



Localização UTM 23S: 508373/8631044.

Fonte: ITTI/UFPR, (2019).

Esta unidade é constituída predominantemente por sedimentos inconsolidados, quartzarenitos com estratificação cruzada, além de siltitos e conglomerados, com porções silicificadas. A parte superior da unidade exposta, na zona vadosa, pode exibir elevado grau de alteração, com intensa lixiviação, bioturbação recente ou até desenvolvimento de crostas laterito-silicosas (TEIXEIRA NETTO, 2012).

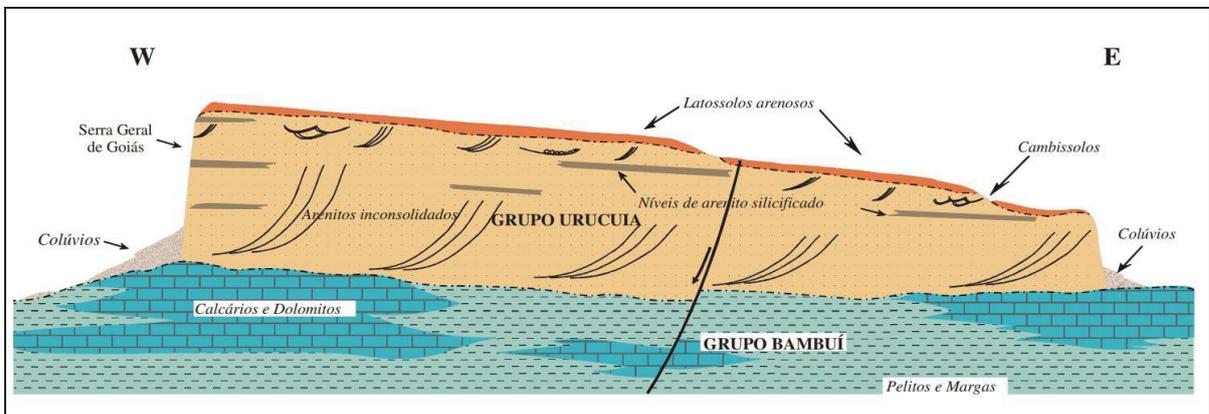
Como embasamento da Bacia Sanfranciscana são consideradas todas as unidades que foram substrato para a deposição das sucessões fanerozóicas. O Grupo Bambuí constitui as coberturas sedimentares neoproterozóicas de maior expressão da Bacia Sanfranciscana (CAMPOS, 1996). Corresponde às rochas carbonáticas, dispostas horizontalmente ou suavemente onduladas com metamorfismos fraco/incipiente (EGYDIO-SILVA *et al.* 1989).

2.2.1 Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí é composto por estratos, geralmente tabulares, assentados em discordância, sobre rochas do embasamento cristalino, do Supergrupo Espinhaço e da Formação Jequitaí. É encoberto, com contatos da mesma natureza, pelas rochas sedimentares cretáceas do Grupo Urucua e por formações superficiais cenozoicas (FIGURA 2.6). No estado da Bahia Egydio-Silva (1987) subdividiu o Grupo Bambuí em três formações: São Desidério, Serra da Mamona e Riachão das Neves.

A Formação São Desidério é constituída por metacalcários cinza-escuros, predominantemente puros, com intercalações de margas e metasiltitos. De acordo com Egydio-Silva (1987), a formação apresenta espessura estimada em 450 metros na região. Sua deposição sedimentar ocorreu em bacia intracratônica de mar raso, em ciclos transgressivos e regressivos. O contato inferior da unidade se dá por discordância angular e erosiva com rochas do embasamento gnáissico e migmatítico observado, por exemplo, na região de Correntina/BA, ao sul da área de estudo, enquanto o contato superior é gradual, de forma que os calcários se tornam mais argilosos da Fm. Serra da Mamona.

FIGURA 2.6 – SEÇÃO ESQUEMÁTICA DA RELAÇÃO ENTRE OS GRUPOS URUCUIA E BAMBUÍ.



Fonte: Gaspar *et al.* (2006).

A Fm. Serra da Mamona sobrepõe-se a metacalcários e metamargas da Fm. São Desidério, por contato basal gradual. Sotopõe-se a metarcóseos da Fm. Riachão das Neves, unidade constituída por camadas alternadas de metacarbonatos e metapelitos de grau metamórfico incipiente a fraco, formando estratos espessos intercalados de metasiltitos esverdeados, metacalcários negros, metamargas e ardósias micáceas, além de intervalos de metarenitos finos, na base (EGYDIO-SILVA, 1987).

2.3 COBERTURAS FANEROZÓICAS DA BACIA SANFRANCISCANA

A litoestratigrafia da Bacia Sanfranciscana é definida pela sucessão dos Grupos Santa Fé (Neopaleozóico), basal, seguido pelos Grupos Areado

(Eocretáceo), Mata da Corda (Neocretáceo), Urucuia (Neocretáceo) e a Fm. Chapadão (coberturas mais recentes). Esta configuração estratigráfica não é unânime na literatura, Sgarbi (1989, 1991) e Kattah (1991) consideram as rochas do Grupo Areado como unidade basal da seção. Todavia, Campos (1992); Campos e Dardenne (1994, 1997b), Sgarbi *et al.* (2001) propuseram que associação litológica do Grupo Santa Fé, preservada em vales escavados no embasamento na porção meridional da Bacia Sanfranciscana, como unidade basal da bacia. A coluna estratigráfica adotada neste trabalho é a de Campos e Dardenne (1997).

2.3.1 Grupo Urucuia

As rochas do Grupo Urucuia destacam-se em importância pelo seu volume e extensão em área na Bacia Sanfranciscana ocorrendo de forma relativamente homogênea, com pouca variação litológica, em parte dos estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Tocantins e Piauí. O grupo é constituído pela Formação Posses, basal, composta por rochas siliciclásticas como conglomerados, arenitos e siltitos, depositados em ambientes eólicos e Formação Serra das Araras, de topo, depositadas em ambientes fluviais (SPIGOLON; ALVARENGA, 2002).

Em grande parte da Bacia Sanfranciscana, o Grupo Urucuia sobrepõe diretamente os metassedimentos neoproterozóicos do Grupo Bambuí, mas também ocorre sobrepondo rochas dos grupos Areado e Santa Fé, além de granitos e gnaisses do embasamento (CAMPOS; DARDENNE, 1997).

O Grupo Urucuia, no oeste baiano, compõe-se de quartzarenitos de cores variadas, predominando castanho-avermelhados, róseos e amarelo-esbranquiçados. Possuem granulação entre areia fina a média e, em geral, são friáveis e com pouca ou nenhuma matriz. Em alguns, entretanto, podem ocorrer horizontes com matriz argilosa. Localmente, ocorrem cimentados por material silicoso ou carbonático. Incluem intercalações siltosas e siltico-argilosas e frequentes intervalos conglomeráticos dispersos.

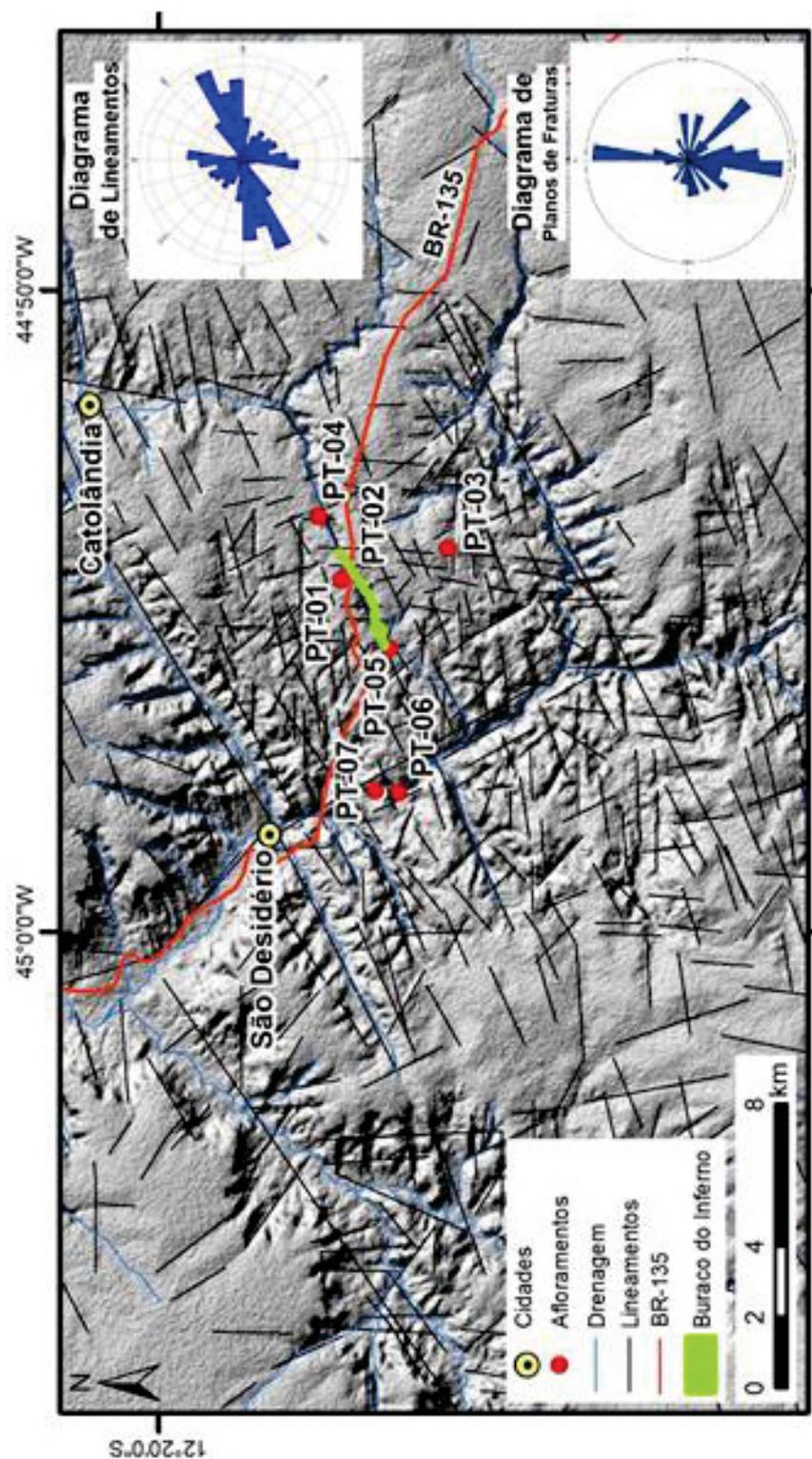
Com base na flora de micro e microfósseis, o grupo foi datado como de idade Cretáceo Inferior (Moutinho da Costa *et al.*, 1976; Ghignone, 1979, *apud* Amorim Junior e Lima, 2007). As espessuras do Grupo Urucuia variam de 450 m na porção oeste da Bacia Sanfranciscana, a aproximadamente 50 a 100 m na porção leste, podendo estar reduzidas ou mesmo ausentes em algumas partes da bacia.

2.4 ESTRUTURAÇÃO REGIONAL

O contexto estrutural regional foi definido por análise de lineamentos de grande escala identificados no modelo de elevação do terreno, acompanhados por análise de planos de fraturas obtidas em campo. Os resultados revelaram o predomínio de estruturas de direção N-S para as estruturas de pequena escala, e NE-SW para as de grande (FIGURA 2.7 e FIGURA 2.8).

Tais estruturas, condizentes as descritas por Campos e Dardenne (1997), foram por eles atribuídas à reativação neotectônica ocorrida no início do Cenozoico, responsável pelo padrão de drenagem retangular local. As estruturas de menor escala têm a mesma orientação das estruturas rúpteis que geraram espaço de acomodação para a deposição do Grupo Urucuia. As de grande extensão são concordantes com a estruturação do Grupo Bambuí associada a Faixa Rio Preto conforme descrito por Caxito *et al* (2010).

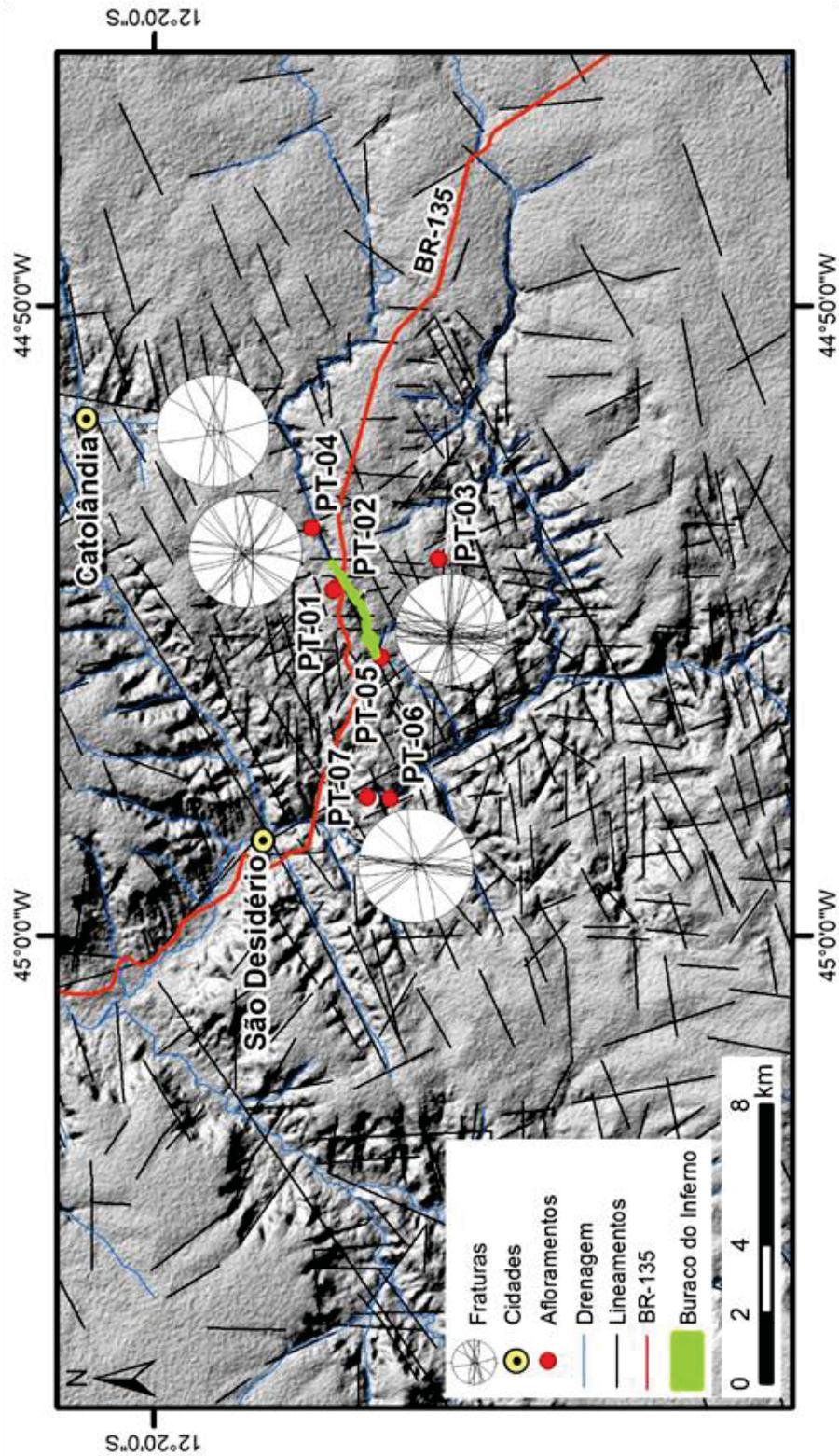
FIGURA 2.7 – ESTRUTURAÇÃO TECTÔNICA REGIONAL, COM INDICAÇÃO DOS LOCAIS (PONTOS) DE COLETA DE DADOS DE CAMPO, DIAGRAMAS DE DIREÇÕES DE LINEAMENTOS E ATITUDES DE FRATURAS.



Localização UTM 23S: PT-01) 504482/8631846; PT-02) 504628/8631776; PT-03) 505445/8631227; PT-04) 508272/8631003; PT-05) 514635/8632753; PT-06) 514416/8632725; PT-07) 503988/8630485.

Fonte: ITTI/UFPR (2019).

FIGURA 2.8 – ESTEREOGRAMAS DAS ATITUDES DE ESTRUTURAS RÚPTEIS (FRATURAS E JUNTAS) MAPEADAS NA REGIÃO.



Localização UTM 23S: PT-01) 504482/8631846; PT-02) 504628/8631776; PT-03) 505445/8631227; PT-04) 508272/8631003; PT-05) 514635/8632753; PT-06) 514416/8632725; PT-07) 503988/8630485.
 Fonte: ITTI/UFPR (2019).

2.5 CONTEXTO E CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA

O mapeamento geomorfológico realizado por Passo *et al.* (2010) no município de São Desidério respeitou três níveis hierárquicos da formação do relevo conforme IBGE (2009), (QUADRO 2.1).

QUADRO 2.1 – COMPARTIMENTAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO

NÍVEL CATEGÓRICO	CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA	CLASSES
1º	Domínios morfoestruturais	Cobertura sedimentar da Bacia São Franciscana (Grupo Urucuia) Cobertura sedimentar do Cráton São Francisco (Grupo Bambuí)
2º	Regiões geomorfológicas	Chapadas do São Francisco, depressões da margem esquerda do rio São Francisco.
3º	Unidades geomorfológicas	Chapadas intermediárias, topos, frentes de recuo erosivo, rampas, planícies intraplanálticas, veredas, planícies intraplanálticas, escarpas e mesas

Fonte: Pereira Passo *et al.*, (2010).

O primeiro grau de classificação, domínios morfoestruturais, refere-se aos grandes compartimentos regionais agrupados de acordo com o arcabouço geológico, natureza das rochas e tectônica que atuou sobre elas que, sob efeitos climáticos variados ao longo do tempo geológico, geraram amplos conjuntos de relevos com características próprias, cujas feições embora diversas, guardam, entre si, as relações comuns com a estrutura geológica a partir da qual se formaram.

No município de São Desidério identificam-se as Coberturas Sedimentares São Franciscanas, representadas por planaltos e chapadas desenvolvidos em rochas sedimentares do Grupo Urucuia, e a do Cráton São Francisco, representados pelas depressões interplanálticas, tendo como embasamento a cobertura de rochas metamórficas de baixo grau, do Grupo Bambuí. Em rochas do grupo desenvolveram-se chapadas e planícies de baixa declividade, durante o Fanerozóico. O Grupo Bambuí, ocorre em depressões interplanálticas, cuja origem se deu por processo erosivo intenso causado pelas ações de fatores exógenos - sistema clima - ao longo do tempo geológico entre o Neoproterozóico e o Fanerozóico. (IBGE, 2009; EGYDIO-SILVA, 1987; EGYDIO-SILVA *et al.*, 1989; CAMPOS E DARDENNE, 1997).

No segundo nível de classificação, as regiões geomorfológicas, referem-se às feições geneticamente ligadas aos processos formadores de determinados conjuntos litoestruturais, em função dos fatores climáticos pretéritos e atuais, lhes conferem características genéticas comuns, agrupando feições semelhantes, associadas às formações superficiais. Dessas unidades destacam as *Chapadas do São Francisco* e as *Depressões da margem esquerda do rio São Francisco*.

As Chapadas do São Francisco são planas e descontínuas devidas aos processos erosivos atuantes sobre os arenitos do Grupo Urucuia, onde predomina a vegetação do cerrado sobre latossolos. Apresentam-se bordejadas por escarpas e ressaltos dos modelados de dissecação. Na região geomorfológica Depressões da margem esquerda do rio São Francisco é constituída por áreas planas inclinadas e com leves concavidades desenvolvidas durante as fases sucessivas de retomada de erosão sobre as rochas pertencentes aos grupos Bambuí e Urucuia.

O terceiro nível de classificação corresponde às unidades geomorfológicas, levando em conta as semelhanças altimétricas e fisionômicas do relevo. Os processos de gênese, formação e o modelado possuem características próprias que as diferenciam, determinadas por características paleoclimáticas, litológicas e estruturais. Nesse nível, o município de São Desidério apresenta oito unidades apresentadas a seguir:

1) chapadão: situado nas porções mais elevadas do relevo de feições aplanadas comumente com presença de escarpas nas bordas. Essa unidade desenvolveu-se em rochas do Grupo Urucuia;

2) escarpa: caracterizada por um desnível abrupto do relevo nas margens do chapadão, prolongando-se em linha reta ou sinuosa. Sua feição se dá na forma de despenhadeiro ou penhascos;

3) frente de recuo erosivo: porções do relevo com processos erosivos atuantes, encaixadas entre o chapadão ou escarpas e as bases das vertentes;

4) planície interplanáltica: conjunto de formas de relevo plano ou suavemente ondulado que ocorrem nas áreas dissecadas. Em geral, essas formas situam-se em baixa altitude, onde os processos de sedimentação superam os de erosão;

5) planícies intraplanálticas: situadas no interior do chapadão, com feições planas a suavemente onduladas;

6) mesas: formadas por processos morfogenéticos ativos em rochas de origem sedimentar. Constitui uma feição de relevo residual, com topos aplanados e geralmente limitados por escarpas;

7) rampas: formadas por acumulação de depósitos gravitacionais dispostas entre o chapadão e as planícies;

8) veredas: localizadas em áreas planas ou aplanadas por erosão, tais como nas chapadas e coberturas sedimentares. É resultante de processos de exsudação do lençol freático sujeitos à atuação de sistemas morfoclimáticos de cerrado.

A área de estudo integra região morfoescultural denominada *frentes de recuo erosivo e escarpas*, onde predominam os processos erosivos intensos, que prevalecem na morfogênese. Em menor intensidade, ocorrem os processos estáveis nas unidades de chapadas intermediárias, topos, mesas e veredas, onde prevalece a pedogênese além dos processos deposicionais nas unidades de planícies e rampas, onde há certo equilíbrio entre a pedogênese e a morfogênese. Este é o contexto das depressões periféricas do cráton neoproterozóico, onde predominam as áreas de carstificação, incluindo a área de estudo, inserida no Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues.

2.6 HIDROLOGIA

A área do estudo pertence à microbacia do rio São Desidério, sub-bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, a qual está localizada na região fisiográfica do Médio São Francisco (CBHSF, 2016).

2.6.1 Região fisiográfica do médio São Francisco

A bacia hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) ocupa cerca de 8% do território nacional, estendendo-se desde Minas Gerais, na Serra da Canastra, até a divisa entre Sergipe e Alagoas, na foz no Oceano Atlântico (CBHSF, 2016).

Trata-se de uma bacia de suma importância para o suprimento de água para diversos fins no contexto do desenvolvimento social e econômico para a região e para o Brasil. O uso predominante da água em todas as regiões fisiográficas da BHSF é para a irrigação, seguido do abastecimento público. Na região do Médio São

Francisco, respectivamente, esses usos correspondem a 91% e 4% de toda a água captada (CBHSF, 2016).

Segundo o IBGE (2019), em 2014, o uso do solo da bacia hidrográfica encontrava-se majoritariamente antropizado, com dominância de estabelecimentos agropecuários em 56,9% da área total, seguido pelas áreas de pastagem (19,9%), outros/diversos (8,3%), matas e/ou florestas (9,7%), lavouras (4,3%) e área urbanizada (0,9%). A região fisiográfica do Médio São Francisco apresentava distribuição semelhante, composta por 57,6% de estabelecimento agropecuários, 17,8% de áreas de pastagem, 11,7% de matas e/ou florestas, 7,1% de outros/diversos, 5,6% de lavouras e 0,3% de áreas urbanizadas.

Na área da bacia estão presentes os biomas da *Mata Atlântica*, *Cerrado* e *Caatinga*, biomas de elevado valor do ponto de vista de conservação da natureza e relevante papel na conservação dos recursos hídricos. O desmatamento desses biomas na BHSF é da ordem de 5% na Mata Atlântica, 56% no Cerrado e 39% na Caatinga. Além disso, a salinização dos solos está entre os fatores da desertificação do solo e normalmente está vinculado à agricultura irrigada (CBHSF, 2016).

A bacia do rio São Francisco de maneira geral apresenta vastas áreas de fragilidade ambiental, sendo que largas porções da bacia se encontram afetadas por processos de desertificação e salinização dos solos. Esses processos são interdependentes e causados pela ocupação intensiva da terra, e normalmente associadas com secas, fertilização química, irrigação gerenciada de maneira ineficiente, deflorestamento e sobrepastoreio. Em condições favoráveis à erosão e com as matrizes de solo desprotegidas, o ambiente pode tornar-se desertificado.

O Plano de Recursos Hídricos (CBHSF, 2016), baseado em documentos produzidos pelo Ministério do Meio Ambiente, mapeou uma série de tipo de riscos geológicos e geomorfológicos. As áreas do Baixo e Submédio São Francisco são caracterizadas pelo semiárido, por áreas prioritárias para conversação definidas pelo Programa PróÁgua Semiárido Antidesertificação e áreas afetadas por processos de desertificação em nível muito grave e com núcleos de desertificação consolidados. A região do Médio São Francisco é caracterizada pelo semiárido e áreas subúmidas secas, nos quais os processos de desertificação em nível moderado. O Alto São Francisco é caracterizado pela fragilidade ambiental associada às características geológicas e geomorfológicas relacionadas as áreas cársticas.

2.6.2 Bacia do Alto Rio Grande

A Bacia do Rio Grande possui uma área de 75.710 km² e compreende a Região de Planejamento de Gestão das Águas (RPGA) do Rio Grande - RPGA 23 (INEMA, 2019). Mais especificamente, a região pertence à sub-bacia do Alto Rio Grande, esta que ocupa uma área total de 33.447 km², com comprimento da rede de drenagem igual a 4.196 km (CBHSF, 2016).

O rio Grande nasce na Serra Geral de Goiás, no oeste do município de São Desidério, na Bahia, e atravessa o estado em direção nordeste até desaguar no rio São Francisco, já na cidade de Barra. Ao longo desse percurso são estabelecidas sete sub-bacias: Rio Preto (rios Riachão, Sassafrás, Sapão e Ouro); Rio Branco (rios de Janeiro, Branco, Entrudo, Balsas e Cachorros); Rio de Ondas (rios Pedras, Borá e Ondas); Rio de Fêmeas (rios Fêmeas, Mosquito, Roda Velha, Pratinha, Estiva, Triste e Feio); Alto Rio Grande (rios Fervedouro, Grande, Bravo e Porcos); Rio São Desidério e Rio Tamanduá ou Boa Sorte (CBHSF, 2016).

A área de estudo localiza-se entre as bacias dos rios São Desidério, das Fêmeas, de Ondas e Boa Sorte, todos afluentes do rio Grande. Já o subtrecho do empreendimento entre os km 207 e 226, localiza-se na sub-bacia do rio São Desidério.

De acordo com o CBHSF (2016), a estimativa de vazão entre o período de 1931-2013 é de 143,4 e de 137,1 m³/s para o as regiões do Alto Rio Grande e Baixo / Médio Rio Grande, respectivamente. Ainda, a vazão de permanência Q₉₅ e a vazão mínima Q_{7,10} são iguais a 93,0 m³/s e 85,2 m³/s para a região do Alto Rio Grande e 82,5 e 81,1 m³/s para o Baixo e Médio Rio Grande.

O rio Grande tem sido submetido a impactos ambientais de grande relevância, principalmente, pelas atividades de agricultura irrigada, que causam processos erosivos e descaracterização da vegetação. Além da agricultura têm-se as atividades urbanas e industriais, o extrativismo vegetal e mineral e a pecuária. Como há uso de defensivos agrícolas, o rio Grande não está isento de contaminação.

Em relação à vazão consumida (para os diferentes usos), a bacia do Alto Rio Grande é a segunda com maior captação na região do Médio São Francisco, com consumo de 10% da vazão total (atrás do Rio Paracatu – 14%) e demanda hídrica superior a 20 m³/s (ANA, 2013; 2017).

Quanto ao balanço hídrico, o CBHSF (2016) apresenta a comparação da disponibilidade com a demanda de água conforme o uso, a qual foi baseada no método da razão Demanda VS Q95, a modelagem de todas as necessidades da bacia, por meio do programa LabSid-Acquanet, e o balanço hídrico subterrâneo. Esse estudo apontou que há situações de super exploração na bacia. Em relação à bacia do Alto Rio Grande, tanto a modelagem matemática quanto o balanço hídrico subterrâneo apresentaram resultados “excelentes”, significando garantia de abastecimento. Já a demanda hídrica superficial, expressa pela razão Demanda/Q95 regularizado, apresentou situação “muito crítica”, para qual se sugere a necessidade de intensa atividade de gerenciamento do recurso hídrico.

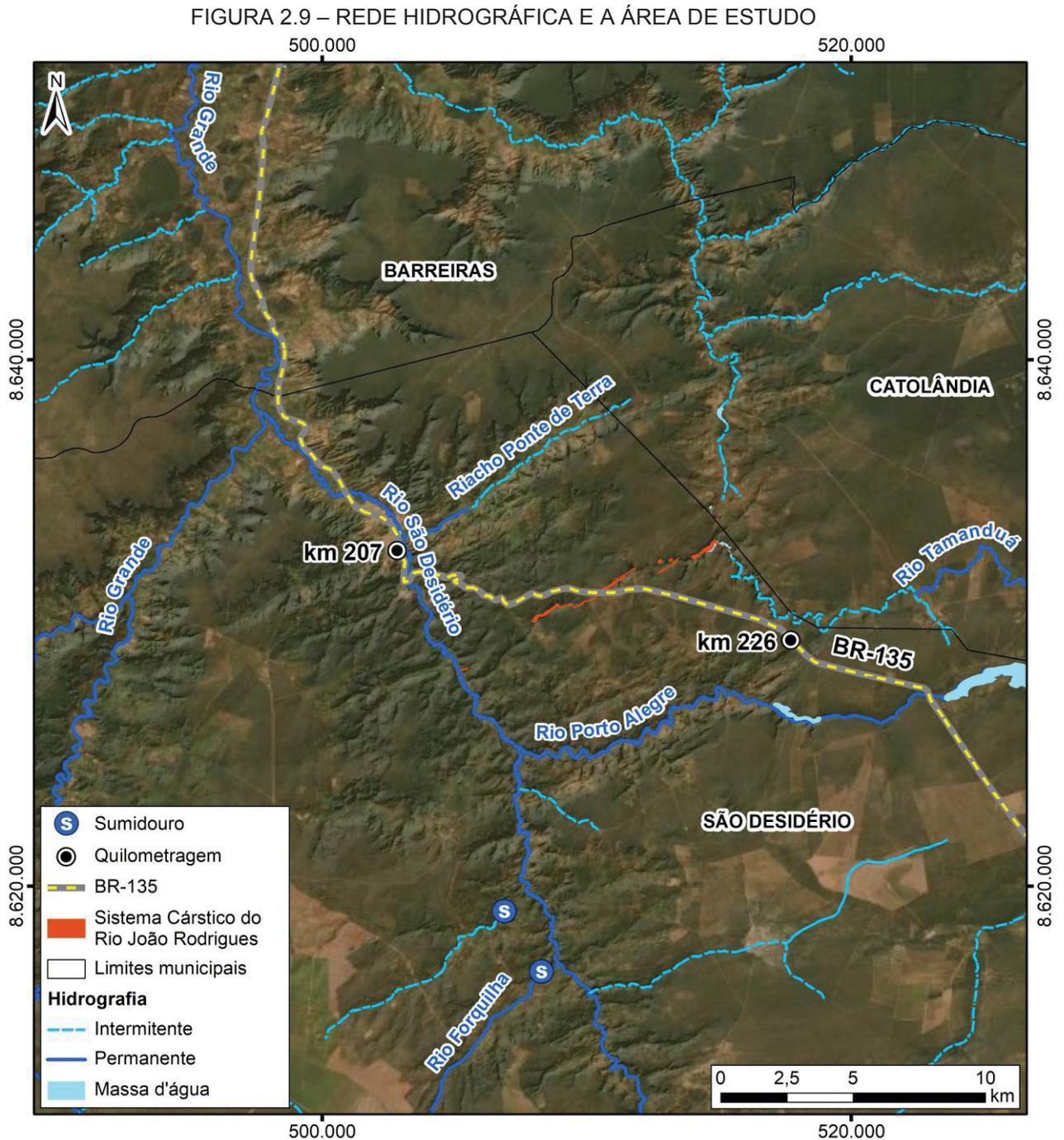
2.6.3 Bacia do rio São Desidério

O rio São Desidério, de extensão aproximada de 67 km, nasce na confluência do riacho Serra Dourada e da vereda de Cocos, no município de Baianópolis. Na primeira metade do trajeto, flui no sentido leste-oeste, cruzando a BR-135 nas imediações do km 269, no povoado de Campo Grande. Na segunda metade, flui na direção sul-norte, cruza a zona urbana de São Desidério e deságua no rio Grande (FIGURA 2.9).

Durante o percurso, os principais afluentes são o riacho da Passagem e o rio Porto Alegre (também chamado de Santa Helena ou Marimbu), na divisa entre os municípios de São Desidério e Baianópolis. O sistema Cárstico formado pelo rio subterrâneo João Rodrigues e o riacho Ponte de Terra. Apesar de pouco estudada, a microbacia do rio São Desidério apresenta uma estação para monitoramento da qualidade da água no rio Porto Alegre, operada pelo INEMA/INGÁ, nas proximidades da interseção com a BR-135, km 232. Cabe mencionar ainda que o banco de dados do INEMA (2019) diverge do SNIRH (ANA, 2019). No primeiro, o rio Porto Alegre é também denominado rio São Desidério.

Quanto ao uso e ocupação do solo local, há predominância de latifúndios para extração de madeira e formação de pastagens. Além disso, destaca-se a existência de três pedreiras próximas do centro urbano de São Desidério e minifúndios de criação de animais e piscicultura na porção à jusante do centro urbano.

O rio São Desidério tem suas águas poluídas por despejos de esgotos domésticos *in natura* e de resíduos sólidos diversos, lançados na maioria das vezes pela própria população, típico problema de várias cidades brasileiras (SANTOS et al., 2016).



Fonte: Adaptado BDGEx (2014) e IBGE (2015)

Segundo o Plano Municipal de Saneamento de São Desidério (GERENTEC ENGENHARIA, 2015), a operação dos serviços de abastecimento de água está sob

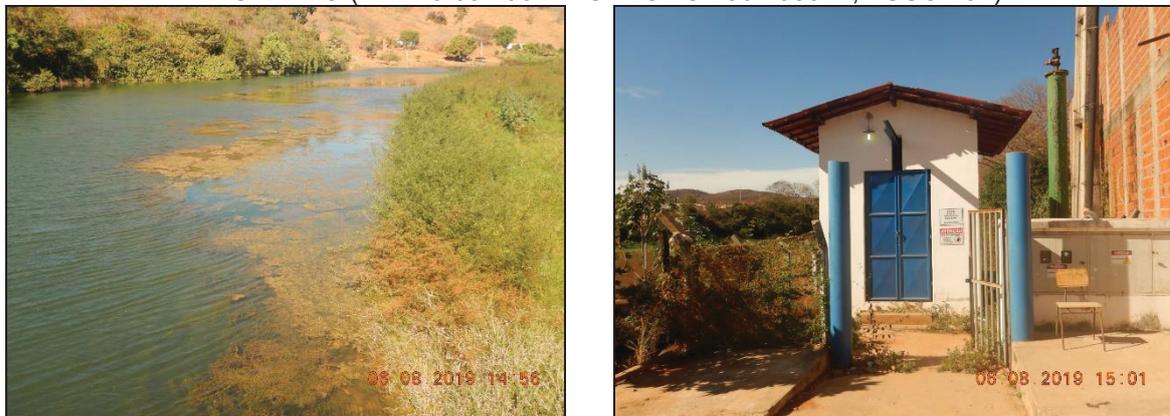
responsabilidade da Empresa Baiana de Água e Saneamento S/A (EMBASA). O abastecimento público, denominado Sistema Local de Abastecimento (SLA) conta com duas captações superficiais flutuantes nos rios Grande e São Desidério (FIGURA 2.10 e FIGURA 2.11), de cerca de 90m³/h.

FIGURA 2.10 – CAPTAÇÃO E BOMBEAMENTO DE ÁGUA BRUTA DO RIO GRANDE (LAT.: 8.637.415 M S / LONG.: 497.825 M; FUSO 23L)



Fonte: UFPR/ITTI (2019).

FIGURA 2.11 – CAPTAÇÃO E ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA BRUTA (EEAB) DO RIO SÃO DESIDÉRIO (LAT.: 8.632.931 M S / LONG.: 502.959 M; FUSO 23L)



Fonte: UFPR/ITTI (2019).

O abastecimento da população do município não atendida pelo SLA é realizado majoritariamente por poços tubulares profundos (31 poços), todos administrados pela Prefeitura de São Desidério, e também por captação superficial direta. O sistema de captação subterrânea também abastece o bairro Ponte Velha, na sede do município, o distrito de Roda Velha e algumas comunidades rurais.

No Plano Municipal de Saneamento Básico de São Desidério (GERENTEC ENGENHARIA, 2015) cita 185 poços catalogados no município, dos quais apenas 37 apresentam medidas de nível estático, nível dinâmico e vazão de estabilidade.

Para o abastecimento da sede de São Desidério estão catalogados 31 poços que abastecem 1.562 domicílios, com 1.558 ligações ativas. Considerando a população urbana e rural, são atendidos 1841 domicílios. Todos os poços estão localizados na sub-bacia Otto 4 de São Desidério, com captação por bombas elétricas. A TABELA 2.1 apresenta a distribuição da forma de atendimento dos domicílios na sede do município.

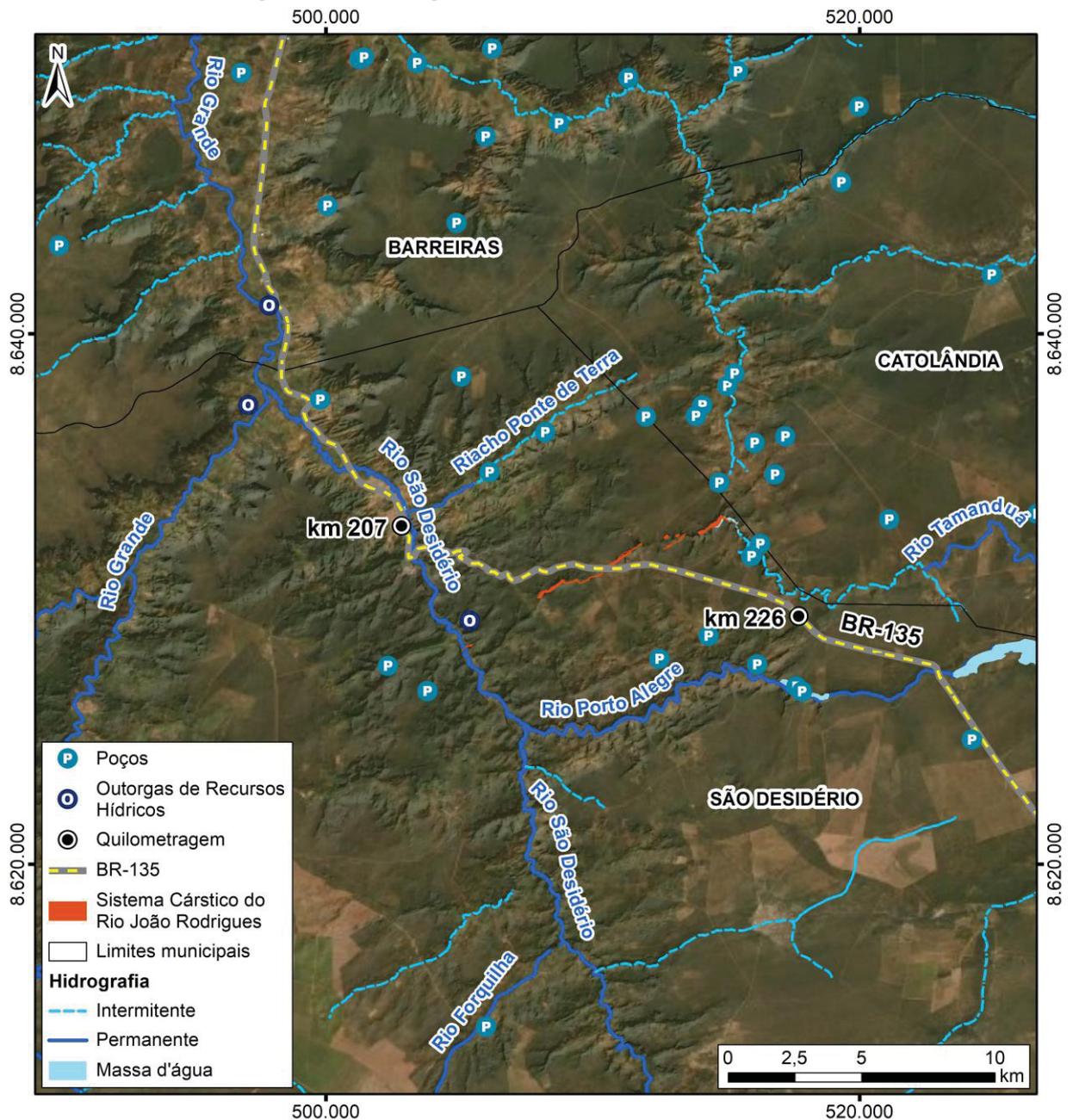
TABELA 2.1 - DOMICÍLIOS E TIPO DE ABASTECIMENTO NA SEDE DO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO

TIPO DE ABASTECIMENTO	SÃO DESIDÉRIO		
	TOTAL	URBANA	RURAL
Rede Geral	3.906	2.035	1.871
Poço ou nascente na propriedade	597	1	596
Poço ou nascente fora da propriedade	1.244	-	1.244
Carro-pipa ou água da chuva	14	-	14
Rio, açude, lago ou igarapé	1.215	190	1.025
Outra	57	21	36
Total	7.033	2.247	4.786

Fonte: IBGE (2010) *apud* Plano Municipal de Saneamento Básico de São Desidério (2015).

Em consulta aos bancos de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM), do Sistema Estadual de Informações Ambientais e de Recursos Hídricos (INEMA, 2019) e da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), verificou-se que na área de estudo há 58 poços cadastrados no CPRM (FIGURA 2.12). A distribuição desses poços está concentrada no quadrante nordeste da área, sobretudo nos vales e depressões da Formação Serra da Mamona, à margem direita dos rios São Desidério e Grande.

FIGURA 2.12 – POÇOS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA E OUTORGAS DE USOS MÚLTIPLOS



Fonte Adaptado BDGEx (2014), INEMA (2014) e IBGE (2015)

Com base nos dados disponibilizados no SIAGAS/CPRM, no modelo digital do terreno e nos afloramentos hídricos foi efetuada a interpolação do nível estático dos poços para obtenção de linhas teóricas da profundidade do nível freático.

As maiores profundidades do aquífero freático (entre -20,0 m e -50,0 m) estão situadas em áreas de exposição das formações da Serra da Mamona, sobretudo nas chapadas à oeste da área urbana de São Desidério e a leste da área

urbana de Barreiras. As porções mais rasas encontram-se ao longo dos rios Grande e São Desidério.

Destaca-se também que os poços constantes no banco de dados e mais próximos das alternativas locacionais do empreendimento estão apresentados no QUADRO 2.2. A maioria dos poços são de natureza tubular e profundos, com níveis estáticos que variaram até 30m de profundidade e vazão de estabilização de até cerca de 26 m³/h.

QUADRO 2.2 – POÇOS EXISTENTES NA REGIÃO

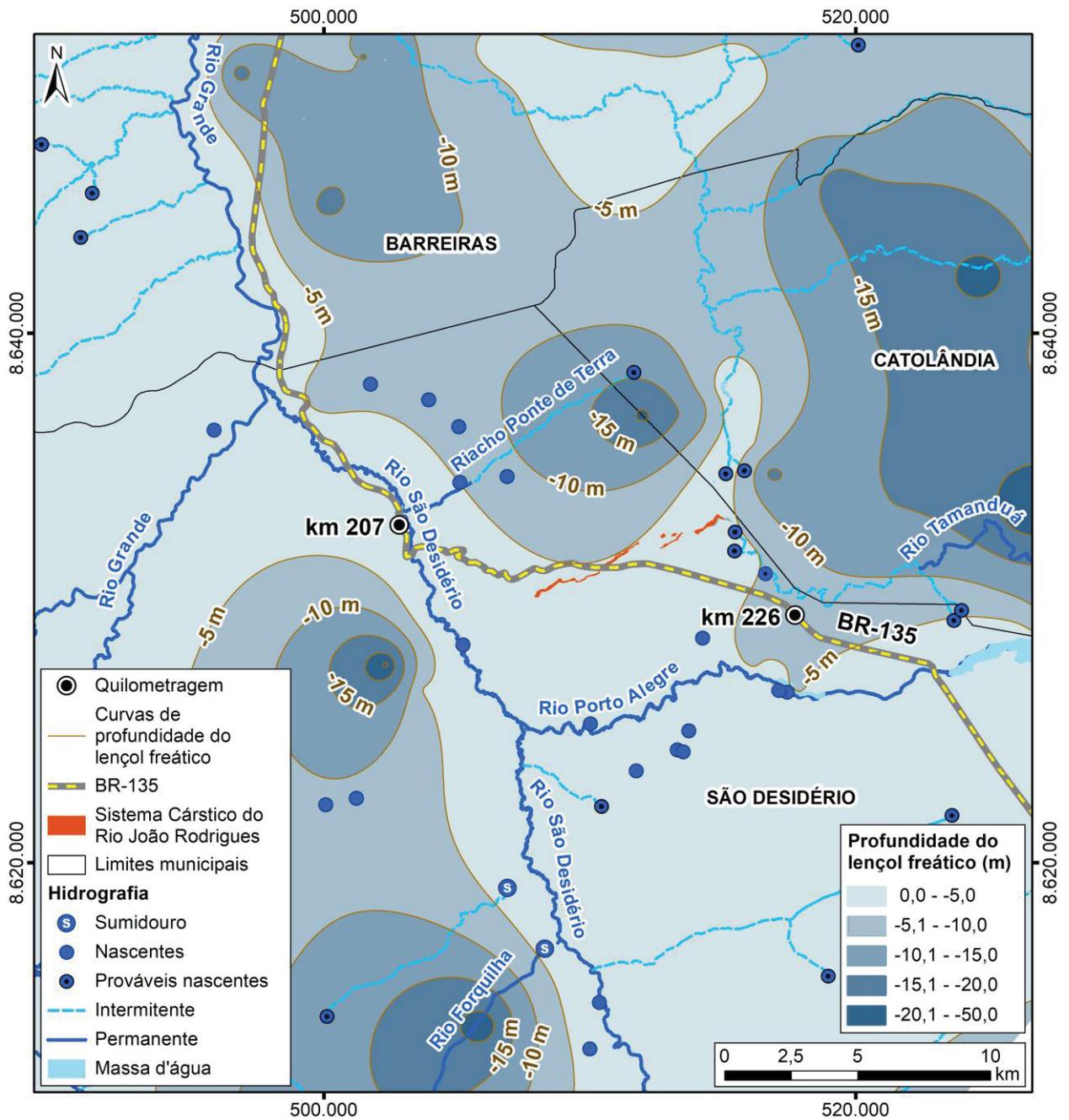
Número do poço	Localidade	Natureza	Nível estático (m)	Nível dinâmico (m)	Vazão estabilização (m ³ /h)
2900001044	Agrovila do Angico I	Tubular	8,41	59	11,31
2900006093	Tatu I	Tubular	8,6	15,33	26,38
2900013368	Riacho Grande	Ponteira	13,59	15,31	20,8
2900013372	Baixo S. Matias	Tubular	7,19	62,44	1,83
2900013375	Ponte de Terra	Tubular	3,6	92,4	0,6
2900013377	Central	Tubular	27,7	32,05	9,3

Fonte: CPRM (2019).

Com base nos recursos hídricos também foram marcados 37 possíveis afloramentos existentes na área de estudo, também chamados de prováveis nascentes ou olhos d'água, embora a maioria tenha expressão apenas na época de chuvas. Além dessas, há 20 nascentes, cuja localização foi fornecida pela prefeitura Municipal de São Desidério, por meio do Programa Municipal de Recuperação de Nascentes (FIGURA 2.13).

Do total, 10 nascentes estão localizadas em locais aonde são encontrados cambissolos háplicos, associando a nível raso do freático (entre -5,0 m e -10,0 m de profundidade) à quebra de terreno e transição de regiões sedimentares para chapadas e oito estão localizadas nas imediações do rio Porto Alegre.

FIGURA 2.13 – MAPA DE PROFUNDIDADES ESTIMADAS DO NÍVEL ESTÁTICO DO AQUÍFERO FREÁTICO



Em relação às outorgas de usos múltiplos emitidas pelo Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - INEMA, há 11 outorgas para captações superficiais ou subterrâneas e uma outorga de lançamento de efluente (QUADRO 2.3).

QUADRO 2.3 - OUTORGAS DE USOS MÚLTIPLOS DE ÁGUA

Requerente	Portaria	Uso	Vazão (m³/dia)	Vazão efluente (m³/dia)	Tipo de captação
Almery Messias da Silveira	311	Abastecimento Industrial	8	0	Subterrânea
EMBASA	5560	Não informado	0	0	Não informado
Jefferson Marcus Ruela	71/11-DG	Abastecimento Humano	1	0	Não informado
Joar Evandro Motta	708/11	Abastecimento Humano, Irrigação	4,86	0	Superficial
Posto de Combustível Alto da Serra LTDA	DISP-0042	Abastecimento Industrial	35,6	0	Subterrânea
Posto JJ Garcia	424/11	Abastecimento Industrial	15,04	0	Superficial
Real Expresso Ltda	161/11 e 159/11	Abastecimento Humano	3	0	Não informado
EMBASA	021/96	Abastecimento Humano	27.500	0	Superficial
EMBASA	413/99	Abastecimento Humano	288	0	Superficial
EMBASA	412/99	Abastecimento Humano	220	0	Superficial
EMBASA	543/09	Lançamento de Efluentes	1.066.485 *	22.997	Superficial
EMBASA	020/96	Abastecimento Humano	1950	0	Superficial

* Embora aparentemente incompatível com realidade, o dado foi extraído diretamente da Portaria 543/09-DG.

Fonte: INEMA (2019).

Conforme o Plano Municipal de Saneamento de São Desidério (GERENTEC ENGENHARIA, 2015), a prefeitura não realiza coleta e tratamento de esgoto sanitário no município, situação que perdura ainda em 2019. Portanto, o efluente doméstico não é tratado, sendo adotadas soluções individuais como o lançado diretamente nos corpos d'água, no solo (fossa séptica ou rudimentar) ou na rede de drenagem pluvial, IBGE, (2010).

2.7 HIDROGEOLOGIA

Em relação às águas em subsuperfície a área pertence à Província Hidrogeológica São Francisco, mais especificamente na região de ocorrência de dois sistemas aquíferos, o Sistema Aquífero Urucuia e Sistema Cástrico-Fissural do Grupo Bambuí, aos quais são correlacionados a distribuição de unidades geológicas interdependentes hidráulica e/ou fisicamente (FIGURA 2.14).

O Sistema Aquífero Urucuia – SAU, corresponde ao aquífero livre do tipo intergranular constituído pelos arenitos do Grupo Urucuia. Como descrito no item sobre geologia, essa unidade é caracterizada por espessas camadas de quartzo arenitos, além de intercalações de pelitos e arenitos silicificados responsáveis por pequenas variações nas características do aquífero, localmente suspenso ou confinado. As dimensões e características hidrodinâmicas adotadas são apresentadas no QUADRO 2.4, Gaspar (2006).

QUADRO 2.4 – CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS DO AQUÍFERO

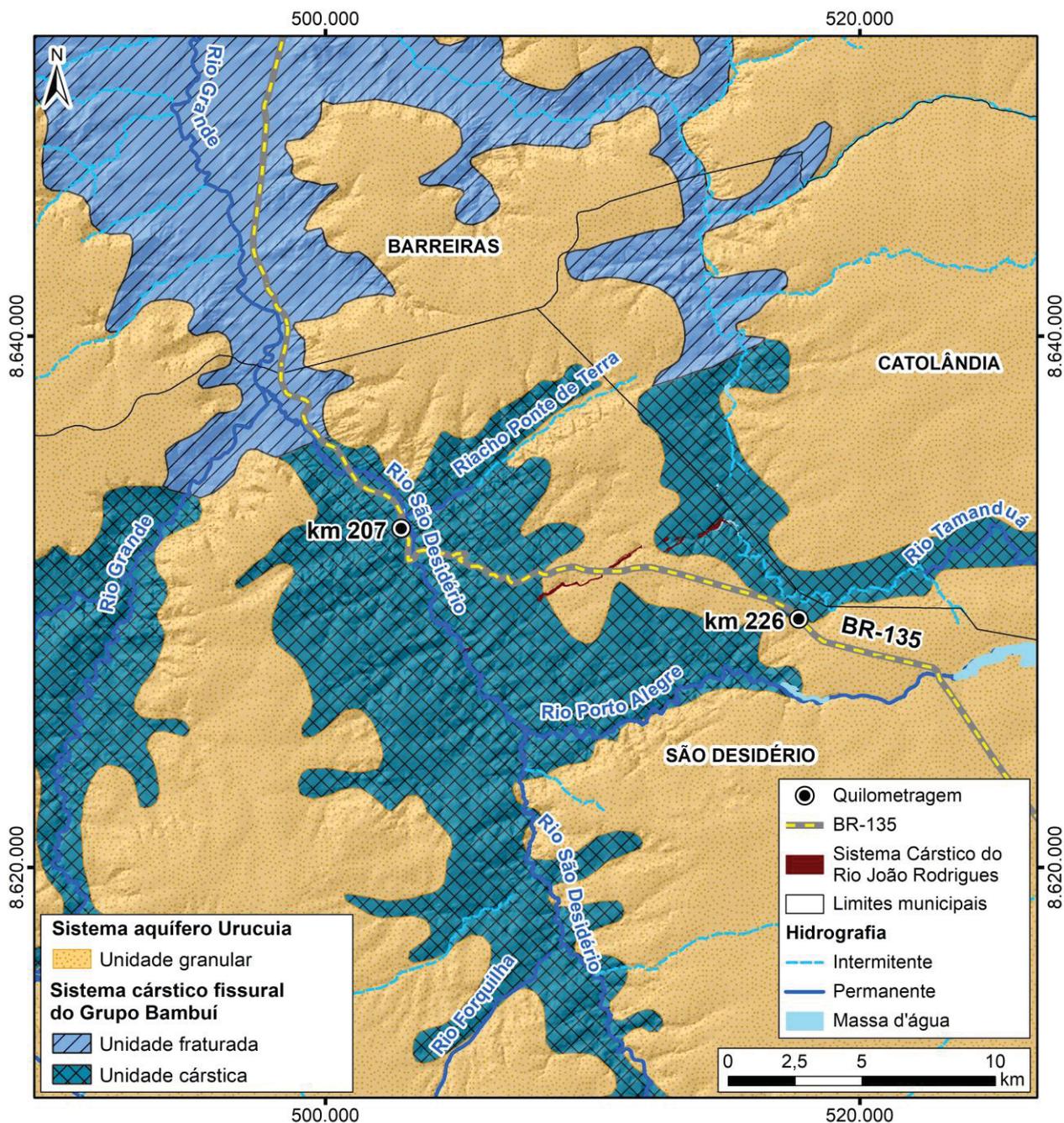
Característica	Valor
Espessura total	100 a 600 m
Espessura saturada	80 a 460 m
Condutividade hidráulica média	1,3.10 ⁻⁶ m/s nas porções livres 2,8.10 ⁻⁵ m/s sob confinamento
Transmissividade média	4,0.10 ⁻⁴ m ² /s nas porções livres 1,17.10 ⁻² m ² /s sob confinamento
Área de abrangência	86.000 km ²
Área efetiva	76.000 km ²
Quando fora da área efetiva desempenha função filtro e contribui na recarga dos demais sistemas aquíferos.	

Fonte: Gaspar (2006).

A recarga do aquífero se dá pela infiltração de água meteórica nas áreas de chapada caracterizadas pelo relevo plano e elevado com desenvolvimento de latossolos. A rota dos fluxos a partir da recarga é em parte condicionada por anisotropias devidas a contatos e acamamento das rochas carbonáticas subjacentes, e por sistemas de fraturamentos que criam zonas de maior permeabilidade, favorecendo o escoamento (HIDROVIA, 2012).

Em relação ao uso do aquífero, a exploração é predominantemente realizada por poços destinados para irrigação e abastecimento doméstico. A água do aquífero também controla a alimentação e, portanto, a vazão dos afluentes da margem esquerda do médio São Francisco (GASPAR; CAMPOS, 2007).

FIGURA 2.14 – SISTEMAS AQUÍFEROS DA ÁREA DE ESTUDOS



Fonte: Adaptado CPRM (2010) e BDGEx (2014).

Na área de estudo, de acordo com Gaspar (2006), o Sistema Aquífero Urucua, não compreende apenas uma área efetiva do sistema aquífero, mas desempenha a função reguladora da rede de drenagem superficial. Encontra-se sobreposto às rochas carbonáticas e pelíticas do Grupo Bambuí que compreendem o Sistema Cárstico-Fissural do Grupo Bambuí.

O Sistema Cárstico-Fissural do Grupo Bambuí é um aquífero livre, anisotrópico e heterogêneo, devido à quantidade variada de intercalações pelíticas e

os vazios do sistema cárstico. As regiões de maior porosidade estão relacionadas com: 1) ocorrências dos litotipos carbonáticos, que propiciam desenvolvimento de zonas de dissolução caracterizando a porção cárstica do sistema; e 2) regiões de intenso fraturamento predominantemente nos litotipos siliciclásticos, caracterizando a porção fissural do aquífero (ANDRADE, CASCAES, 1990).

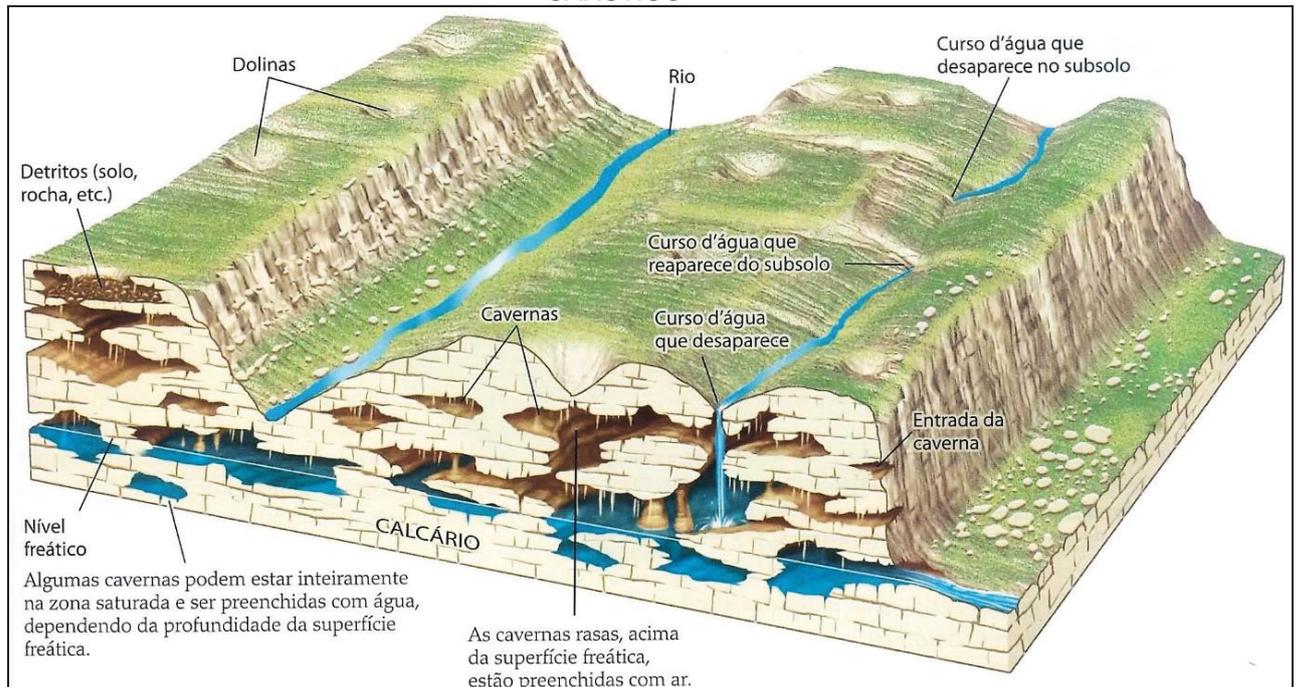
Andrade *et al.* (1990) afirma que a recarga do sistema aquífero se dá nas áreas de incidência direta da chuva sobre as rochas do Grupo Bambuí, além da contribuição direta de águas provenientes do Sistema Aquífero Urucuia. O fluxo subterrâneo na unidade é condizente aos da rede de drenagem superficial condicionada pela estruturação. Os autores mediram vazões de 5 a 10 m³/h, com resíduo total de 300 a 600 mg/l e durezas de até 300 mg/l.

As características físicas e parâmetros hidráulicos são bastante variadas devido à heterogeneidade desse sistema aquífero, com a caracterização predominante de vazões menores de 20 m³/h, mas alcançando até 300 m³/h em zonas mais carstificadas, de recarga direta devido a exposição das rochas ou em zonas de elevado fraturamento. Segundo os autores as águas subterrâneas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas-cloretadas cálcicas, refletindo a composição dos solos e rochas.

2.8 ESTUDO GEOLÓGICO DO SISTEMA CÁRSTICO

As rochas do Grupo Bambuí, em especial as unidades carbonáticas, são propícias à formação de cavidades (KARMANN; SANCHEZ, 1979). Este é o contexto geológico do Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues, que na região compreende a Formação São Desidério predominantemente composta por rochas metacálcárias. Tais rochas condicionam o desenvolvimento do relevo cárstico, conjunto de formas de dissolução em superfície e subsuperfície produto da descalcificação natural das rochas pela ação do intemperismo (FIGURA 2.15).

FIGURA 2.15 – PRINCIPAIS FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS/GEOLÓGICAS DO RELEVO CÁRSTICO



Fonte: Adaptado de Grotzinger e Jordan (2013).

As feições superficiais (exocarste) são: a) lapiás, feições de intemperismo por águas meteóricas; b) sumidouros, entradas de cursos de água superficial para a subsuperfície; c) ressurgências, onde um curso retorna a superfície; e d) dolinas, depressões fechadas com forma circular a oval. Essa última é uma feição muito comum em áreas de relevo cárstico, e por vezes, controlar localmente a rede hidrográfica (FIGURA 2.16). Elas podem ser classificadas de acordo com sua gênese (TRAVASSOS *et al*, 2015), em dolina de:

a) dissolução, pela concentração da dissolução superficial da rocha e aprofundamento de uma depressão;

b) abatimento, queda ou desmoronamento do teto de uma cavidade estabelecendo ligação entre o exocarste e endocarste;

c) subsidência, depressão/recalque de rochas e/ou solo sobrepostos rochas carstificáveis, fase inicial para o desenvolvimento de uma dolina de abatimento;

d) sufusão, uma dolina de subsidência associada ao desenvolvimento de vazios devido à remoção de material particulado desagregado da rocha, pelo escoamento de água subsuperficial em fissuras.

FIGURA 2.16 – BURACO DA SUCUPIRA, EXEMPLO DE DOLINA DE ABATIMENTO, DO SISTEMA CÁRSTICO DO RIO JOÃO RODRIGUES.



Fonte: ITTI/UFPR (2014).

Em subsuperfície, no interior do maciço rochoso, são encontradas as cavidades (endocarste), que podem estar secas ou servindo de conduto para as águas e deposição de sedimentos provenientes da superfície quando acima do nível freático, ou totalmente preenchidas por água quando abaixo. O desenvolvimento de cavidades pode ser facilitado pela estruturação da rocha e a diferença do gradiente hidráulico entre as áreas de recarga e descarga hídrica.

No limite superior da rocha carbonática (epicarste) em contato com outro material inconsolidado ou não, a alteração da rocha se dá pela circulação da água mais superficial aprofundando o perfil do solo e, quando em áreas de calcário impuro, desenvolve-se espesso solo argiloso proveniente dos componentes insolúveis (PILÓ, 2000).

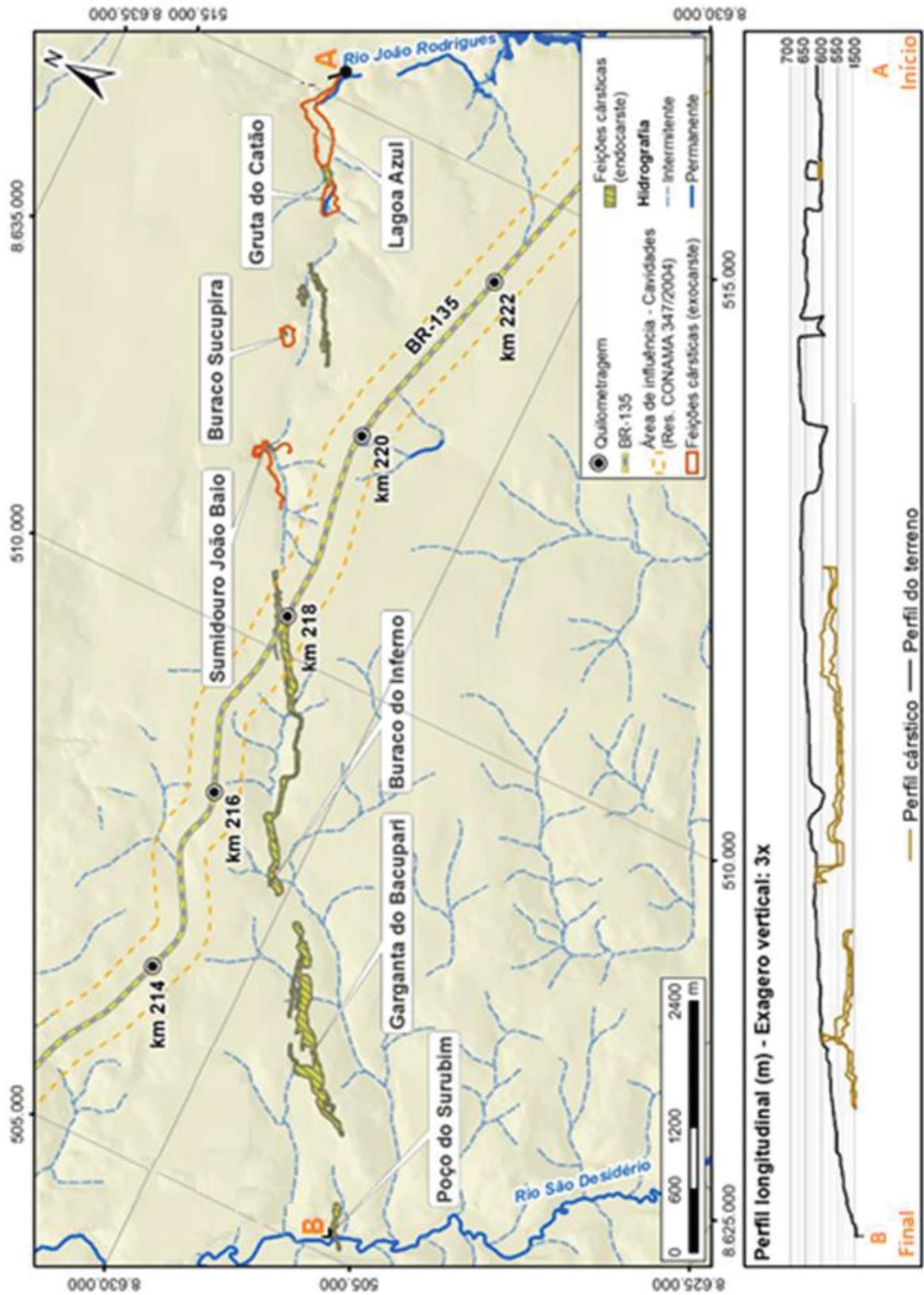
Na área esse relevo é desenvolvido nas rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (metacalcários e metamargas). Tais rochas são mais suscetíveis ao desenvolvimento de vazios, como resultado do intemperismo químico, atuante a partir de fraturas ou zonas mais permeáveis da rocha. Devido à sua constituição geram pouco ou nenhum de resíduo insolúvel ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). A

quantidade de 'impurezas', por exemplo os componentes siliciclásticos de margas, rochas carbonáticas com 35-60% de argila, podem gerar maior quantidade de resíduos insolúveis.

O Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues – SCRJR, é uma feição regional de orientação nordeste-sudoeste constituída por um conjunto de cavidades interligadas principalmente em subsuperfície pelo rio João Rodrigues. Esse sistema localiza-se em região de relevo de baixa amplitude, com morros de topo arredondado, rede de drenagem com pouco entalhamento de vertentes e exposição de rochas ruiformes em meio à paisagem de cerrado (GODINHO; PEREIRA, 2013).

O início desse sistema se dá na ressurgência do rio João Rodrigues na comunidade de Sucupira, que segue superficialmente até um paredão rochoso onde é formada a Lagoa Azul. Deste ponto em diante, segue sentido sudoeste, por meio subterrâneo, ressurgindo e submergindo novamente em duas dolinas até ressurgir no rio São Desidério, no local denominado Poço do Surubim (FIGURA 2.17).

FIGURA 2.17 - LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA CÁRSTICO JOÃO RODRIGUES E A RODOVIA BR-135/BA E UMA SEÇÃO LONGITUDINAL REGIONAL DA ÁREA.

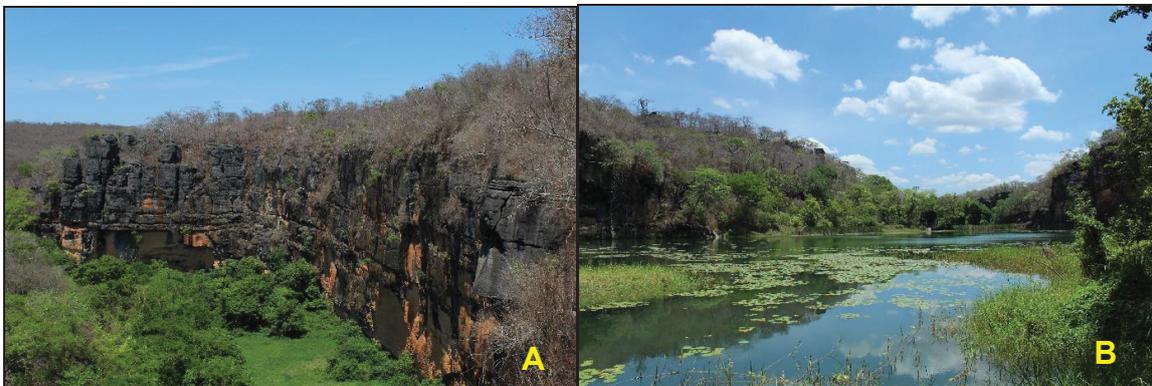


Fonte: O autor (2020).

A nascente do rio João Rodrigues é formada pela surgência de água em exposição de rochas da base do Grupo Urucuaia, no contato com rochas do Grupo Bambuí, na comunidade de Sucupira em São Desidério.

Esse contato marca uma brusca diferença de permeabilidade entre os arenitos Urucuaia, considerado um excelente aquífero, e as rochas calcárias do Bambuí. A partir desta nascente, o rio percorre superfície ladeada por paredões de rocha calcária até ser represado na Lagoa Azul, principal atrativo do Parque Municipal da Lagoa Azul (FIGURA 2.18 A e B).

FIGURA 2.18 – PARQUE MUNICIPAL DA LAGOA AZUL: A) MIRANTE CÂNION DO CATÃO; B) MIRANTE LAGOA AZUL



Fonte: ITTI/UFPR (2019).

No parque também é possível observar feições cársticas superficiais como lapiás e visitar a Gruta do Catão. A gruta tem cerca de 50 m de largura, 7 m de altura e 200 m de extensão. É atravessada pelo curso d'água proveniente da lagoa (FIGURA 2.19 A), que juntos, integram o rio João Rodrigues. A gruta exhibe espeleotemas com formas arredondadas que “se desenvolvem” em direção a saída da gruta (FIGURA 2.19 B).

FIGURA 2.19 – GRUTA DO CATÃO: A) VISTA A PARTIR DA ENTRADA; B) ESPELEOTEMAS



Fonte: ITTI/UFPR (2019).

A jusante do parque o rio segue rumo ao Buraco da Sucupira (FIGURA 2.20), uma dolina de colapso com cerca de 50 metros de profundidade. Na sua base do leito do rio João Rodrigues, há entrada para duas cavidades denominadas Gruta da Sucupira I e II.

FIGURA 2.20 – VISTA DE PARTE DO PAREDÃO DA DOLINA BURACO DA SUCUPIRA

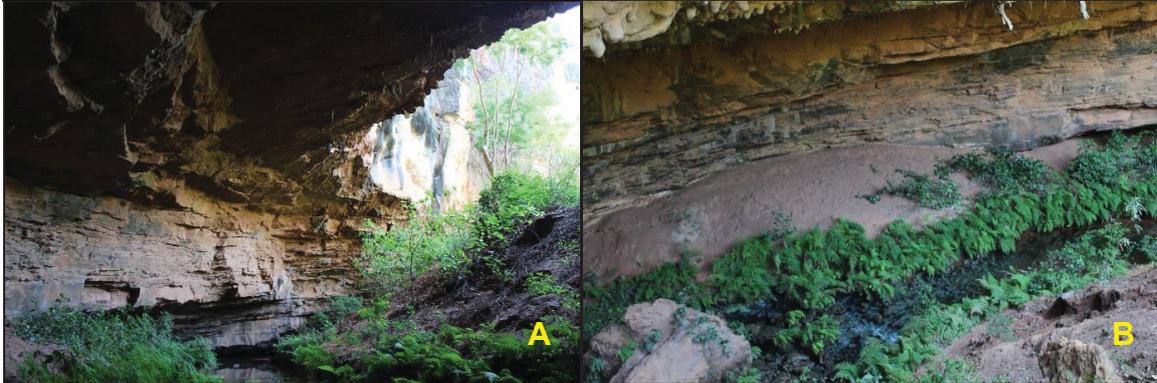


Fonte: ITTI/UFPR (2014).

O curso d'água, que segue em subsuperfície, ressurgue no Sumidouro do João Baio (FIGURA 2.21 A), uma dolina onde é possível observar-se o fenômeno de ressurgência do rio que atravessa um pequeno trecho da dolina (FIGURA 2.21 B) e retorna para subsuperfície sob um paredão de rochas calcária formando um sumidouro. A ressurgência segue um padrão de vazão em intervalos regulares de

aproximadamente 3 minutos, atribuído ao sifonamento do fluxo, no qual a água deve atingir um volume mínimo para atravessar o obstáculo.

FIGURA 2.21 – SUMIDOURO DO JOÃO BAIO: A) VISTA DA BASE; B) RIO JOÃO RODRIGUES



Fonte: ITTI/UFPR (2019).

A seguir, o rio percorre as cavidades denominadas Buraco do Inferno (FIGURA 2.22 A) e Garganta do Bacupari, ambas cavernas de grandes dimensões, com padrão de desenvolvimento linear, lagos subterrâneos e entradas localizadas na base de dolinas. A interseção com a BR-135/BA ocorre a partir do cruzamento da rodovia não pavimentada sobre a cavidade Buraco do Inferno, para então seguir em direção a Garganta do Bacupari. A última feição do sistema cárstico é a ressurgência do rio João Rodrigues no Poço do Surubim (FIGURA 2.22 B), localizada próxima à confluência com o rio São Desidério, do qual é afluente.

FIGURA 2.22 – A) VISTA DA BASE DA DOLINA DE ACESSO A CAVIDADE DO BURACO DO INFERNO; B) POÇO DO SURUBIM



Fonte: ITTI/UFPR (2017; 2019).

2.9 POTENCIAL E CARACTERIZAÇÃO ESPELEOLÓGICA

Atualmente existem dois cadastros de cavernas disponíveis, referências para o patrimônio espeleológico no Brasil, o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV/ICMBio) e o Cadastro Nacional de Cavernas do Brasil (CNC) da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).

De acordo com o cadastro de cavidades do ICMBio/CECAV, (2015), no estado da Bahia foram cadastradas, até o momento, pouco mais de 1.200 cavernas, sendo que 200 localizam-se no município de São Desidério. As variações litológicas existentes ao longo do segmento da BR-135/BA, entre os km 206 e 226, permitem caracterizar a área de estudo com relação à potencialidade de ocorrência de cavernas, segundo critérios do ICMBio – CECAV, em setor de muito alto potencial espeleológico.

Para a província espeleológica Bambuí (KARNANN; SANCHEZ, 1979), que compreende as rochas da Formação São Desidério, têm-se também as cavidades prospectadas pela empresa Ambiental Consultoria e pela UFPR/ITTI em campanhas realizadas nos anos de 2015 e 2019, entre elas o Buraco do Inferno, a maior cavidade do SCRJR, e que por ter seu traçado sob a rodovia foi foco dos estudos geofísicos e caracterizações geotécnicas apresentadas nos próximos itens.

No contexto local deste estudo, onde foi realizado o caminhamento prospectivo no segmento do km 206 ao 226 da BR-135/BA, foram encontradas 13 cavidades naturais localizadas em distância de 250 metros de cada lado do eixo da rodovia (TABELA 2.2) e (FIGURA 2.23). As cavernas foram identificadas e comparadas com o cadastro nacional de cavernas do CECAV.

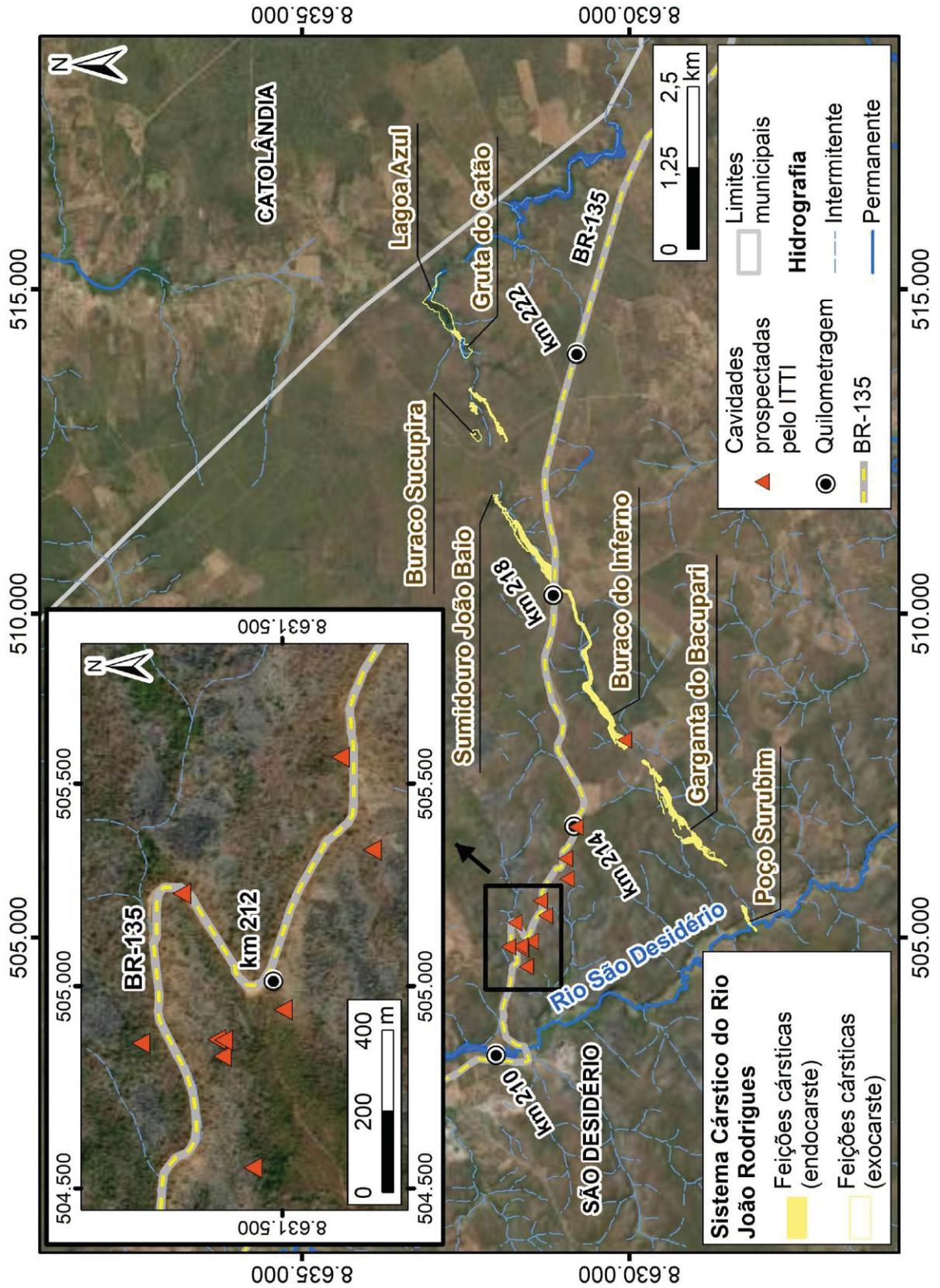
TABELA 2.2 – CAVERNAS LOCALIZADAS NA ÁREA DE PROSPECÇÃO

CAVIDADE	CÓDIGO DE CADASTRO	COORDENADAS UTM: 23L		ALT. (m)	MUNICÍPIO
Abismo Desab I	Sem cadastro	505906 E	8630952 S	603	São Desidério
Abismo Desab II	BA-0817	504870 E	8631658 S	574	São Desidério
Gruta da Estrada	BA-0820	505229 E	8631746 S	587	São Desidério
Gruta DES I	BA-0835	506704 E	8630813 S	613	São Desidério
Gruta DES II	BA-0902	506219 E	8630976 S	634	São Desidério
Gruta DES III	BA-0819	504942 E	8631498 S	567	São Desidério
Gruta DES IV	BA-0894	505336 E	8631281 S	581	São Desidério
Gruta DES V	BA-0832	505566 E	8631359 S	587	São Desidério
Gruta DES VI	Sem cadastro	504552 E	8631573 S	544	São Desidério

Gruta DES VII	BA-0818	504827 E	8631647 S	558	São Desidério
Gruta DES VIII	BA-0816	504868 E	8631661 S	576	São Desidério
Gruta do Jorjão	BA-0831	504859 E	8631846 S	578	São Desidério
Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério	BA-0304	508.394 E	8659761 S	557	São Desidério

Fonte: ITTI (2015, 2019).

FIGURA 2.23 – CAVIDADES CADASTRADAS E PROSPECTADAS EM DISTÂNCIA DE 250 M DE CADA LADO DO TRAÇADO DA RODOVIA (KM 207 AO 226)

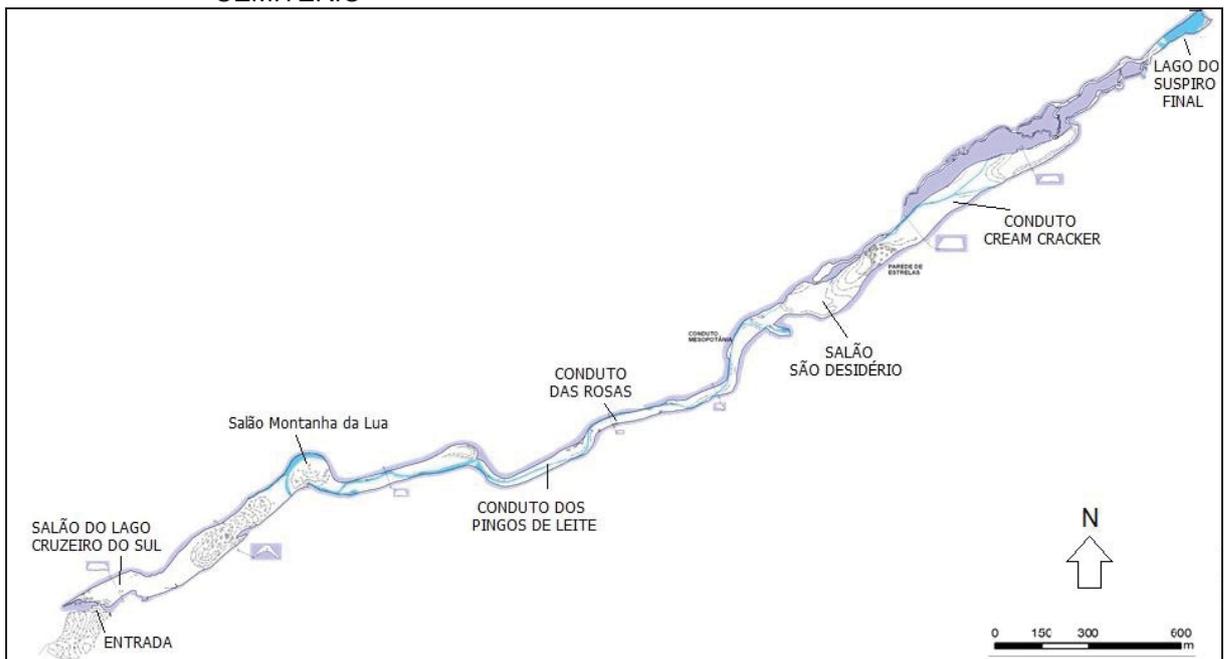


Fonte: Adaptado do Google (2019)

2.9.1 BURACO DO INFERNO DA LAGOA DO CEMITÉRIO

Cavidade predominante horizontal localizada às margens da BR-135/BA com a sua única entrada identificada distando aproximadamente a 1000 m do traçado atual da rodovia, nas proximidades do km 216. Trata-se da maior cavidade, em todos os critérios dimensionais, do sistema cárstico (FIGURA 2.24). A cavidade possui um conduto principal de grandes dimensões que segue, a partir de sua entrada, em sentido nordeste. Possui variados espeleotemas e alguns deles raros pelo seu tamanho métrico, muitos desses com uma beleza única como o escorrimento com chão de estrelas de grandes dimensões em sua galeria principal, muito raro pelo seu tamanho. Apresenta curso d'água subterrâneo perene, formado pelo rio João Rodrigues.

FIGURA 2.24– MAPA TOPOGRÁFICO DA CAVIDADE BURACO DO INFERNO DA LAGOA DO CEMITÉRIO



Fonte: Adaptado de RUBBIOLI, E., (2019).

A caverna do Buraco do Inferno, CECAV-BA-0765 conforme o cadastro no Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV, tem a entrada no fundo de dolina, localizada nas coordenadas 508.033; 8.630.199 (UTM Zona 23 – WGS/1984). Prospecção realizada o seu interior, determinou a distância de 4.710 m

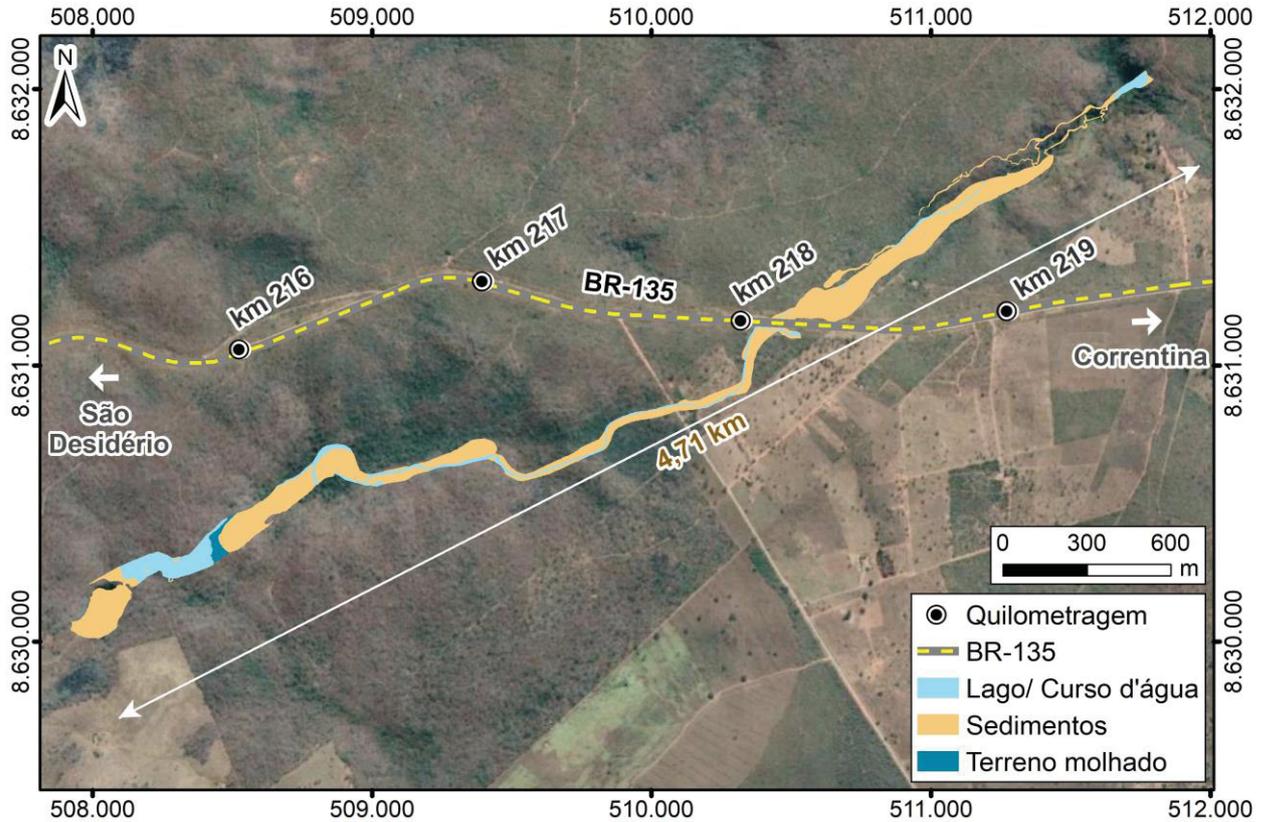
de projeção horizontal, 34 m de desnível, área da projeção de 132.824 m² e um volume aproximado de 1.716.000 m³ (RUBBOLI *et al.*, 2019).

A cavidade possui um dos maiores salões de cavernas do Brasil, o salão do Lago do Cruzeiro, com 12.000 m² (260 m de extensão e até 60 m de altura). Este salão está diretamente associado a entrada da cavidade e o seu outrora “maior lago subterrâneo do Brasil” que se encontra atualmente seco, aparentemente por evolução de processos naturais. Em vistorias realizadas nos anos de 2018 e 2019, constatou-se que o fluxo do rio subterrâneo João Rodrigues encontrou outro caminho preferencial, formado pela dissolução das rochas carbonáticas, até sua foz no rio São Desidério.

A caverna Buraco do Inferno foi analisada quanto a sua relevância pelas equipes da UFPR em 2019, pois seu desenvolvimento subterrâneo se dá em direção convergente com o eixo atual da BR-135/BA. Sua galeria principal é seccionada em superfície pelo traçado atual desta rodovia (FIGURA 2.25). Mediante topografia expedita, determinou-se que a intersecção entre a rodovia e a caverna se dá no km 217,5 (coordenadas 509.660; 8.631.223 - UTM Zona 23 – WGS/1984) no Salão Desidério nas proximidades da Parede de Estrelas.

Por meio de estudos conjugados de métodos geofísicos não destrutíveis (gravimetria, resistividade e polarização induzida), realizados pelos pesquisadores da UFPR entre os anos de 2014 e 2019, foi possível determinar que o teto da caverna do Buraco do Inferno está localizado a aproximadamente 80 metros de profundidade em relação ao leito da rodovia, sendo desses primeiros aproximadamente 45 m de material arenoso referente ao Grupo Urucua e aproximadamente 35 m de rocha metacálcária do Grupo Bambuí.

FIGURA 2.25 – IMAGEM DO CRUZAMENTO DO BURACO DO INFERNO COM O LEITO ATUAL DA RODOVIA



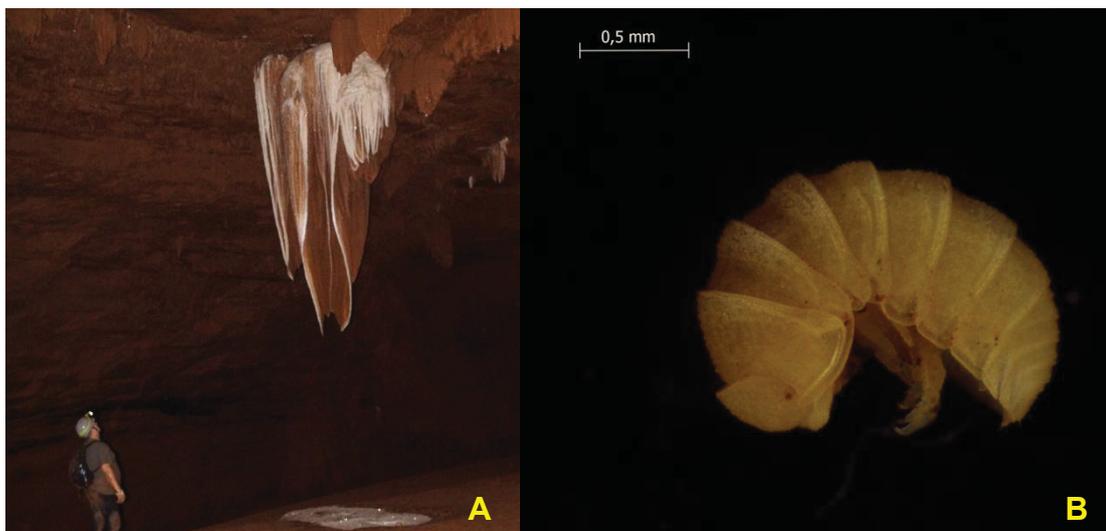
Fonte: O autor (2020).

De acordo com o Art. 3º da Instrução Normativa nº 002 de 30 de agosto de 2017, a caverna Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério, apresenta atributos suficientes para classificá-la com o grau de relevância máxima, itens III, IV e X do Art. 3º da IN:

- III - Dimensões notáveis em extensão, área ou volume;
- IV - Espeleotemas únicos (FIGURA 2.26 A);
- VII - *Habitat* para a preservação de populações geneticamente viáveis de espécies de troglóbios endêmicos ou relictos;
- VIII - *Habitat* de troglóbio raro (FIGURA 2.26 B);
- X - Cavidade testemunho.

A caverna ainda apresentou duas classes de atributos biológicos minimamente significativos sob enfoque local e regional, tendo por isso importância acentuada sob enfoque regional e significativa sob enfoque local.

FIGURA 2.26 – ATRIBUTOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE GRAU DE RELEVÂNCIA MÁXIMA DO BURACO DO INFERNO: A) ESPELEOTEMA; B) *Gabunillo sp.* - ESPÉCIE TROGLÓBIA RARA



Fonte: ITTI/UFPR (2019).

FIGURA 2.27 – SALÃO INTERIOR DA CAVERNA DO BURACO DO INFERNO



FONTE: O autor (2015).

FIGURA 2.28 – ESPELEOTEMAS NO INTERIOR DA CAVERNA DO BURACO DO INFERNO.



FONTE: O autor (2015).

FIGURA 2.29 – ESPELEOTEMAS NO INTERIOR DA CAVERNA DO BURACO DO INFERNO.



FONTE: O autor (2015).

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1 GEOCONSERVAÇÃO

A geodiversidade decorre do conjunto de fenômenos e processos intrínsecos à dinâmica da Terra responsável pela origem de elementos como as rochas, minerais, fósseis e formas de relevo (STANLEY, 2001). Estes recursos favoreceram o desenvolvimento da civilização ao fornecer alimentos abrigo e materiais para construção, por exemplo, proporcionando plenas condições de subsistência e evolução de todas as espécies (GRAY, 2004).

Brilha (2005) afirma que a geodiversidade compreende os aspectos abióticos da Terra, todos os testemunhos de um passado geológico e também todos os processos naturais que atuam sobre as paisagens, modificando-as. Além disso, afirma que a biodiversidade está definitivamente condicionada pela geodiversidade, pois há uma série de condições abióticas indispensáveis ao desenvolvimento da natureza viva.

Durante as últimas duas décadas se consolidou internacionalmente um movimento de conservação, valorização e divulgação de aspectos relacionados à geodiversidade. Dentre muitos exemplos pode-se citar: alguns marcos importantes, como: a) a divulgação da Declaração Internacional dos Direitos à Memória da Terra em 1991, no 1º Simpósio Internacional sobre a Proteção do Patrimônio Geológico; b) a criação de uma lista, em contínuo aprimoramento, com os locais representativos da geologia do planeta, ilustrativos de produtos, processos e da história geológica (o *Global Geosites*, ao longo da primeira metade dos anos 90 do século XX); c) o estabelecimento das redes europeia (2000) e mundial (2004) de geoparques; e d) estabelecimento do Ano Internacional do Planeta Terra, em 2008.

Sharples (2002) ressaltou a importância de se diferenciar patrimônio geológico de geodiversidade; conceitos parecidos e que são algumas vezes utilizados erroneamente como sinônimos. A autora definiu patrimônio geológico como o conjunto de recursos naturais não renováveis, de valor científico, cultural ou educativo, que permite conhecer, estudar e interpretar a história da evolução geológica da Terra e os processos que a modelaram.

Brilha (2005) define patrimônio geológico como o conjunto de geosítios de uma determinada região, ou seja, locais bem delimitados geograficamente, onde ocorrem um ou mais elementos da geodiversidade com singular valor do ponto de vista científico, pedagógico, cultural e turístico.

Da mesma forma que a biodiversidade, a geodiversidade também está sujeita a situações que provocam a descaracterização e/ou a depredação de seus elementos. Seu aspecto robusto não esconde suas inúmeras fragilidades às intervenções antrópicas, que muitas vezes podem resultar de conflitos gerados pela própria admissão de valores à geodiversidade (GRAY, 2004).

Brilha (2005) discutiu como identificar e conservar essa geodiversidade, composta por locais, objetos, solos e processos geológicos realmente importantes que justifiquem estratégias de conservação. Segundo o autor, a conscientização do indivíduo que ocupa a bio e geodiversidade é urgente para melhor articulação em prol da proteção destes locais que podem ser considerados patrimônios geológicos. Brilha (2016) propõe nova abordagem dos conceitos de geodiversidade, patrimônio geológico e geoconservação. Nessa evolução conceitual, considera que apenas uma parte da geodiversidade possui valores que justifiquem sua geoconservação. Cabe aos cientistas e estudiosos na área, o papel de divulgadores e defensores da conservação do patrimônio natural, cujas potencialidades turísticas, e, portanto, também econômicas, se tornem reconhecidas. Para Gray (2005), diferentes elementos da geodiversidade precisam ser protegidos e gerenciados por duas razões, pelo seu valor e pela enorme ameaça presente, frente às inúmeras atividades humanas a que estão submetidos ou expostos.

É frequente o conflito de interesses entre as atividades econômicas e a conservação do patrimônio natural como, neste caso, o espeleológico. No conjunto do patrimônio natural, o patrimônio geológico tem grande vulnerabilidade, porque o substrato constitui a base sobre a qual se desenvolvem as atividades humanas (VIEIRA; CUNHA, 2014).

Um local com atributos geológicos relevantes pode se destacar por mais de um tipo de valor, podendo acarretar uma dualidade de interesses. Na implantação de uma estrada, por exemplo, cujo traçado passe sobre uma caverna considerada de máxima relevância, ou que necessite de materiais de pedreiras localizadas em áreas para qual tenham sido atribuídos valores científicos em função de aspectos de grande importância para as geociências, é possível a existência de conflito com o

valor econômico, caso este local apresente-se viável para o aproveitamento do uso do solo ou de um determinado recurso mineral. O resultado será uma ameaça à integridade do patrimônio com valor científico.

Por se tratar de recursos naturais não renováveis em nossa escala de tempo geológico, a destruição desses patrimônios constitui uma perda irreparável, sendo necessário o desenvolvimento e atividades que visam à conservação e gestão sustentável do patrimônio geológico e dos processos naturais a ele associados, denominadas geoconservação (BRILHA, 2005).

Segundo Gray (2004) a geodiversidade possui valores que justificam a sua conservação, são eles: valor intrínseco; valor cultural, valor econômico, valor funcional e valor científico/educacional. Os motivos que levariam a sociedade a decidir por medidas de conservação e regras para a utilização (ou não) de elementos da geodiversidade prendem-se ao reconhecimento das diferentes modalidades de valores que a eles possam ser atribuídos (SHARPLES, 2002; BRILHA, 2005).

Para que ocorra a geoconservação é necessário que sejam adotadas algumas estratégias que se baseiam em metodologias de trabalho que sistematizam as tarefas no âmbito da conservação do patrimônio geológico. O desenvolvimento de estratégias para a geoconservação de uma determinada região deve levar em consideração fatores como a relevância e raridade das informações geológicas observadas nos geosítios, além do grau de vulnerabilidade aos impactos a que estão submetidos, de modo a criar mecanismos que permitam a aproximação das pessoas e também protejam estas áreas de interesse geológico.

Com relação à promoção e a conservação da geodiversidade, Lopes e Araújo (2011) adicionaram a essa dificuldade, a de existir ainda uma tendência em se pensar que elementos da biodiversidade são mais frágeis e vulneráveis às ameaças, enquanto a geodiversidade é vista como estável e livre de qualquer perturbação antrópica. Para Mansur (2010), essa ameaça antrópica surge pela falta de conhecimento da população e de planos e programas de manejo voltados à valorização dos geosítios. As estratégias de geoconservação agrupadas por Brilha (2005) obedecem etapas sequenciais de inventariação; quantificação; classificação; conservação; valorização; divulgação e monitoramento.

A geoconservação tem como objetivo conservar a diversidade natural dos processos geológicos, geomorfológicos e de solos, garantindo a manutenção da

história de sua evolução (SHARPLES, 2002). Ela deve ser impulsionada pela necessidade de se conservar a geodiversidade, dado o seu valor e as suas ameaças reais devido à falta de proteção e gestão (GRAY, 2005, BRILHA, 2005, 2016, DONG *et al.*, 2013, MOREIRA, 2014, VASILJEV IĆ *et al.*, 2014)

Em muitas situações, é necessário avaliar relevância de um patrimônio geológico como, por exemplo, uma caverna, nos estudos de viabilidade de empreendimentos lineares. Tal avaliação pode tornar-se determinante, tanto para o reconhecimento prévio da necessidade de conservação final da caverna quanto para o futuro do empreendimento. Obras que podem produzir impactos de grande magnitude ao acervo espeleológico deverão ter alterações de traçados e/ou apresentar alternativas tecnológicas para garantir a conservação de determinada cavidade avaliada como relevante.

3.2 ELEMENTOS DE PROTEÇÃO DO PATRIMÔNIO GEOLÓGICO

Na Europa, onde surgiram as primeiras manifestações sobre conservação geológica, a legislação que garante a proteção de patrimônios geológicos foi incorporada à política de conservação da natureza de países, que se encontrava focalizada, fundamentalmente, em valores relativos à biodiversidade.

A legislação europeia mais específica sobre a proteção ao patrimônio geológico trata-se da Recomendação REC (2004), do Conselho da Europa, sobre a conservação do patrimônio geológico e de áreas de especial interesse geológico (2004).

No Brasil, o modelo adotado pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) regida pela Lei 9.985/2000, abrange o conjunto de unidades de conservação (UC) federais, estaduais e municipais. O sistema é composto por 12 categorias de UC, cujos objetivos específicos se diferenciam quanto à forma de proteção e usos permitidos: aquelas que necessitam de maiores cuidados, pela sua fragilidade e particularidades, e aquelas que podem ser utilizadas de forma sustentável e conservadas ao mesmo tempo.

O SNUC foi concebido de forma a potencializar o papel das UC, de modo que sejam planejadas e administradas de forma integrada com as demais UC,

assegurando que amostras significativas e ecologicamente viáveis das diferentes populações, *habitats* e ecossistemas estejam adequadamente representadas no território nacional e nas águas jurisdicionais. Para isso, o SNUC é gerido pelas três esferas de governo, federal, estadual e municipal.

A lei que regulamenta o SNUC tem entre seus objetivos, também proteger as características relevantes de natureza geológica, morfológica, geomorfológica, espeleológica, arqueológica, paleontológica e cultural, conotando assim, o caráter de proteção ao patrimônio geológico.

O órgão consultivo e deliberativo do sistema é representado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que tem a função de acompanhar a implementação e funcionamento do SNUC. O Órgão central é representado pelo Ministério do Meio Ambiente, que tem a finalidade de coordenar o SNUC. E existem órgãos executores representados, na esfera federal, pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e IBAMA. Em caráter suplementar ao encargo das esferas estadual e municipal, pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente. Os órgãos executores do SNUC têm a função de implementá-lo, subsidiar as propostas de criação e administrar as unidades de conservação federais, estaduais e municipais, mas nas respectivas esferas de atuação.

O CECAV foi instituído em 5 de junho de 1997, como Centro Especializado voltado ao estudo, proteção e manejo de cavernas, enquadrado na categoria de unidade descentralizada do IBAMA. Em 2007, com a criação do Instituto Chico Mendes, por meio da Lei nº 11.516, de 28/08/2007, e a definição de suas competências e finalidades, pelo Decreto nº 6.100, de 26/04/2007, a maioria dos Centros Especializados do IBAMA foi incorporada à estrutura organizacional do novo Instituto, dentre eles o CECAV.

A portaria nº 78/2009 do ICMBio, publicada no Diário Oficial da União, de 04/09/2009, criou os *Centros Nacionais de Pesquisa e Conservação*, com objetivo de reconhecê-los como unidades descentralizadas. A partir de então, o CECAV passou a ser denominado *Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas e está vinculado à Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade* do Instituto.

Ao longo de sua existência o CECAV construiu uma identidade e conquistou espaço, criou laços com os mais diversos segmentos da sociedade. Atua de forma conjunta com os diferentes entes que compõem o SISNAMA e atende às

determinações ministeriais para condução dos processos de discussão interinstitucionais, especialmente voltados ao atendimento da legislação ambiental relativa ao patrimônio espeleológico. Em consequência, hoje o CECAV é reconhecido como principal responsável pela conservação do patrimônio espeleológico nacional, destacando-se como interlocutor governamental no campo da espeleologia

3.3 CAVERNAS E A LEGISLAÇÃO DE PROTEÇÃO NO BRASIL

No Brasil conta-se com um lastro jurídico sobre proteção do patrimônio espeleológico em associação com as leis ambientais e as demais resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente que visam proteger a geodiversidade nacional, incluindo o patrimônio espeleológico (PEREIRA, VALADÃO, 2018; MONTEIRO, 2013; GANEM, 2009).

A criação do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV-ICMBIO) em 1997 constituiu a consolidação das políticas públicas que visam à proteção e o manejo das cavidades naturais em território nacional, reconhecendo o zoneamento como uma atividade técnico-político e jurídica importante na conservação/proteção deste subsistema natural (FERREIRA, 2018).

De acordo com o CECAV, (2011), cerca de 90% das cavernas reconhecidas em todo o mundo desenvolveram-se em rochas carbonáticas. No Brasil, no entanto, devido a fatores ainda pouco conhecidos, mas seguramente envolvendo variáveis geomorfológicas e climáticas, também ocorre formação de cavernas em arenitos, quartzitos, depósitos minerais de ferro, granitos, gnaisses, micaxistos e filitos. Até o momento, há cerca de 10.000 cavernas encontram-se registradas nos cadastros espeleológicos existentes do país. Destas, aproximadamente 7.000 em rochas carbonáticas, estimando-se que pode existir um potencial de aproximadamente 150.000 cavernas formadas nesta mesma rocha.

No conjunto de normas legais e específicas para a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro é possível identificar três momentos diferentes quanto à legislação que trata sobre cavernas no Brasil.

O primeiro relaciona-se às primeiras resoluções CONAMA nº 009/1986 e nº 05/1987, a Portaria nº 887/1990 do IBAMA e o Decreto nº 99.556/1990, que se

caracterizam como o momento inicial, com perfil altamente conservador e restritivo quanto ao uso das cavernas brasileiras, quando todas foram consideradas, de forma indiscriminada, patrimônio espeleológico brasileiro.

O segundo momento, foi determinado pela Resolução CONAMA nº 347/2004, conteúdo transicional, entre uma fase de legislação muito restritiva, para uma fase mais flexível quanto ao uso das cavernas brasileiras.

O terceiro momento é compreendido pelo Decreto nº 6.640/2008 e a Instrução Normativa nº 2 do MMA/2009 (posteriormente revogada e substituída pela Instrução Normativa nº 2 do MMA/2017) quando, mediante o estabelecimento de um método criterioso de análise de relevância das cavernas brasileiras, busca identificar aquelas merecedoras de conservação e que formarão o Patrimônio Espeleológico Brasileiro.

O interesse do poder público na proteção e conservação de cavernas foi manifestado oficialmente pela primeira vez na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 009/86, que criou uma comissão especial para tratar de assuntos relativos à preservação do patrimônio espeleológico. Como resultado dos trabalhos da referida comissão foi publicado a Resolução CONAMA nº 005/87, que aprova o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, em que se destaca o item 3º, que estabelece que seja incluída na Resolução CONAMA nº 001/86, a obrigatoriedade de elaboração de Estudo de Impacto Ambiental nos casos de empreendimento potencialmente lesivos ao Patrimônio Espeleológico Nacional.

A Constituição de 1988 constitui um marco na legislação ambiental, pois além de ter sido a responsável pela elevação do meio ambiente à categoria dos bens tutelados pelo ordenamento jurídico, sistematizou a matéria ambiental e estabeleceu o direito ao meio ambiente sadio como um direito fundamental do indivíduo. No âmbito das cavernas e da preservação do carste, a Constituição de 1988 traz em seu Art. 20, que são bens da União: capítulo X, as cavidades naturais subterrâneas e os sítios arqueológicos e pré-históricos.

De acordo com o Art. 3º do Decreto nº 99.556/90, (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 1990), a cavidade natural subterrânea determinada com grau de relevância máximo e sua área de influência, não podem ser objeto de impactos negativos irreversíveis, sendo que o uso futuro próximo a ela deve fazer-se somente dentro de condições que assegurem sua integridade física e a manutenção do seu equilíbrio ecológico, redação dada pelo Decreto nº 6.640/08 (BRASIL. Ministério do

Meio Ambiente, 2008). Para os outros graus de relevância, o impacto negativo irreversível será tolerado; sendo que, quando de alta ou média relevância, a autorização de dano está condicionada à compensação ambiental espeleológica.

Conforme o Art. 4º da resolução CONAMA 347/2004, torna-se obrigatória a avaliação dos possíveis riscos de impactos sobre o patrimônio espeleológico durante a construção e a operação de empreendimentos lineares. O § 1o, cita que as autorizações ou licenças ambientais, na hipótese de cavidade natural subterrânea relevante ou de sua área de influência, na forma do Art. 2o, § 2º, dependerão, no processo de licenciamento, de anuência prévia do IBAMA. A área de influência de uma caverna é determinada na legislação mediante delimitação de uma área preventiva e proteção ao redor da caverna. No Art. 4º, o § 2o cita que a área de influência sobre o patrimônio espeleológico será definida pelo órgão ambiental competente que poderá, para tanto, exigir estudos específicos, a expensas do empreendedor. E de acordo com o § 3o, do Art. 4º, até que se efetivem os estudos específicos, a área de influência das cavidades naturais subterrâneas será a projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de 250 metros, em forma de poligonal convexa.

Em 2008 foi publicado o Decreto nº 6.640 que alterou significativamente os dispositivos do Decreto nº 99.556/1990 e, entre outros pontos, introduziu no arcabouço jurídico brasileiro a possibilidade de permitir impactos negativos irreversíveis de cavernas, bem como o novo conceito de relevância de cavidades naturais subterrâneas, que passaram a ser classificadas em graus máximo, alto, médio e baixo de relevância, sendo somente as de máxima relevância protegidas de qualquer impacto. O Decreto nº 6.640/2008 ainda instituiu, em seu artigo 4º, formas de compensação de danos ambientais relacionadas especificamente à conservação do patrimônio espeleológico no rito do licenciamento ambiental.

A instrução normativa/ICMbio nº 30/2012 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2012), veio a estabelecer procedimentos administrativos e técnicos para a execução de compensação espeleológica de que trata o art. 4º, § 3º, do Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990, alterado pelo Decreto nº 6.640/2008 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2008), para empreendimentos que ocasionem impacto negativo irreversível em cavidade natural subterrânea classificada com grau de relevância alto e que não possuam na sua área, conforme análise do órgão

licenciador, outras cavidades representativas que possam ser preservadas sob a forma de cavidades testemunho.

No caso do presente estudo de caso, a rodovia em construção passa sobre o Sistema Cárstico João Rodrigues entre os km 217 e 218, feição constituída por um conjunto de cavidades interligadas entre si, incluindo a caverna do Buraco do Inferno. Esta cavidade foi classificada de grau de relevância máxima, segundo critérios do art. 3º da IN nº 02/2017 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2017).

3.4 NECESSIDADE DE DEFINIÇÃO DE UMA ÁREA DE SEGURANÇA ESTRUTURAL

O sistema carste e as cavernas têm peculiaridades que os colocam mais vulneráveis às interferências humanas mal planejadas, as quais podem gerar impactos adversos e degradação ambiental. A preservação e conservação das cavernas, sítios espeleológicos e suas respectivas áreas de influência, tem como objetivo a manutenção destes sistemas ecológicos, sensíveis e diferenciados.

O patrimônio espeleológico é um dos poucos recursos naturais protegidos pela legislação vigente de forma mais completa e ampla, mesmo fora de unidades de conservação. Sua importância, perante a nossa legislação, pode ser igualada às áreas de mananciais hídricos. As cavernas constituem uma área muito pequena do território brasileiro e são formações únicas e extremamente relevantes para o entendimento da evolução geológica do planeta, da vida e até da nossa sociedade.

Área de influência, segundo o art. 2º, IV, da Resolução CONAMA é a área que compreende os elementos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola.

Não há consenso quanto a um método único que seja possível definir a área de proteção estrutural das cavidades. Muitos dos aspectos envolvidos não são quantificáveis numericamente, ou são subjetivos e mudam de acordo com a evolução da sociedade e o avanço da ciência. A área de influência de uma cavidade natural subterrânea há de ser definida por estudos técnicos específicos, obedecendo às peculiaridades e características de cada caso.

Na análise do grau de impacto, o órgão licenciador considerará, entre outros aspectos, a intensidade, a temporalidade, a reversibilidade e a sinergia dos referidos impactos. E na avaliação dos impactos ao patrimônio espeleológico, o órgão licenciador deverá considerar os aspectos que envolvem os aspectos físicos, bióticos e culturais.

O processo de licenciamento ambiental atual não é totalmente eficaz para garantir a conservação da natureza. No atual sistema, o empreendedor interessado na liberação de seu projeto contrata diretamente os estudos necessários podendo influenciar para que o resultado lhe seja favorável. Além disso, estes estudos são avaliados apenas pelos órgãos ambientais, hoje fragilizados pela ótica desenvolvimentista do governo, sem garantias de respeito às necessidades e anseios da sociedade civil.

Em um país carente de investimentos e empregos como o Brasil, não se deve aguçar os conflitos entre o setor produtivo e o ambientalista, a ponto de torná-los inegociáveis. O esforço deve ser no sentido de criar mecanismos que atendam a todos os interesses, inclusive os relacionados a ampliação da infraestrutura terrestre, com implantação e melhoria das rodovias e ferrovias nacionais.

Embora a legislação ambiental e, principalmente, a espeleológica tenham revelado grande evolução no tempo, ainda há muito a evoluir em relação aos estudos espeleológicos, a definição de uma área de segurança estrutural e ao cumprimento das leis ambientais para que seja feita uma boa valoração das cavidades e garantir uma correta classificação das mesmas.

Atualmente ainda se discute entre órgãos ambientais licenciadores quanto a um método específico para determinar o limite de segurança estrutural das cavidades impactadas pela construção e operação de rodovias. Até que estudos específicos comprovem a distância e a área de segurança, mantem-se a distância fixa estabelecida pela legislação, não sendo possível assegurar se ela é adequada, insuficiente ou superestimada para proteção. Enquanto isso, várias obras que são necessárias para o desenvolvimento nacional, como estradas, ferrovias, linhas de transmissão e hidroelétricas, estão paralisadas porque não existem estudos suficientes que embasem o órgão ambiental a autorizar o início das obras. Tampouco pode-se garantir que as obras autorizadas e localizadas em áreas com presença de cavidades, não afetam de alguma forma negativa a segurança estrutural destas.

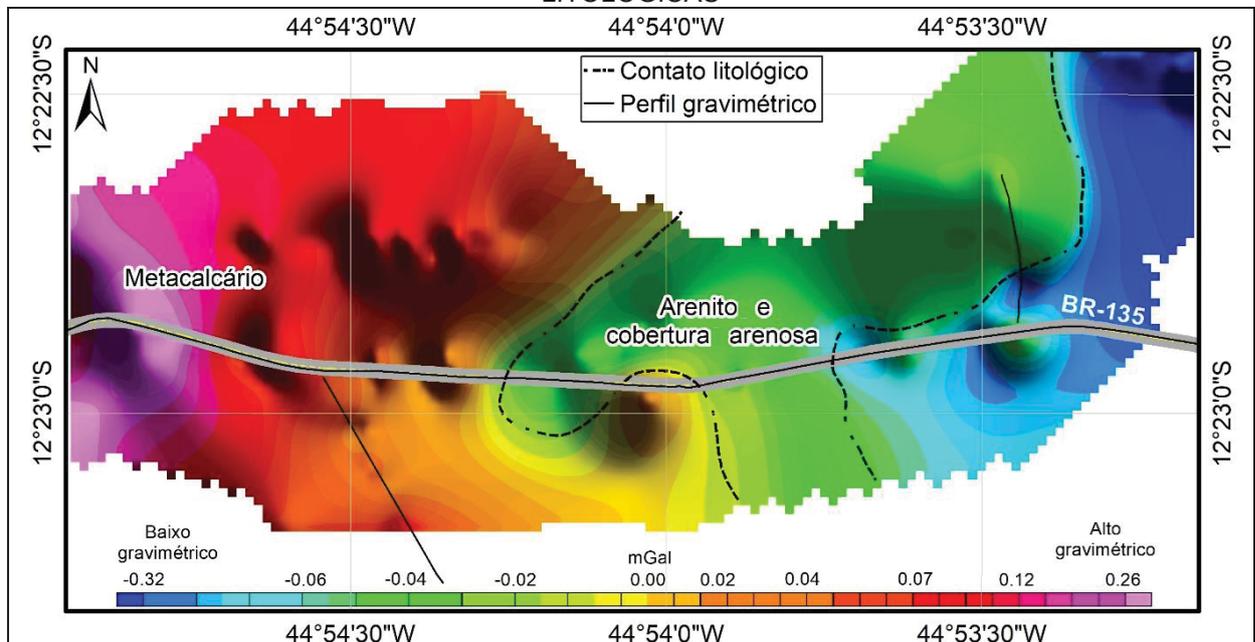
De acordo com Lopes e Araújo (2011), como todo recurso natural, a geodiversidade possui valores e está sujeita à dinâmica da natureza, mas principalmente às intervenções humanas e conseqüentemente às suas ameaças, desta forma é necessário estabelecer medidas que permitam o seu uso de forma sustentável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS USO MÉTODO GRAVIMÉTRICO

As anomalias gravimétricas *Bouguer* exibem tendências de fontes regionais e delimitam as grandes estruturas geológicas na região (FIGURA 4.1), destacando os metacalcários do Grupo Bambuí em alta densidade (cores em vermelho) e grande comprimento de onda, contrastando com fontes de menor densidade (cores em verde e azul) dos arenitos do Grupo Urucua.

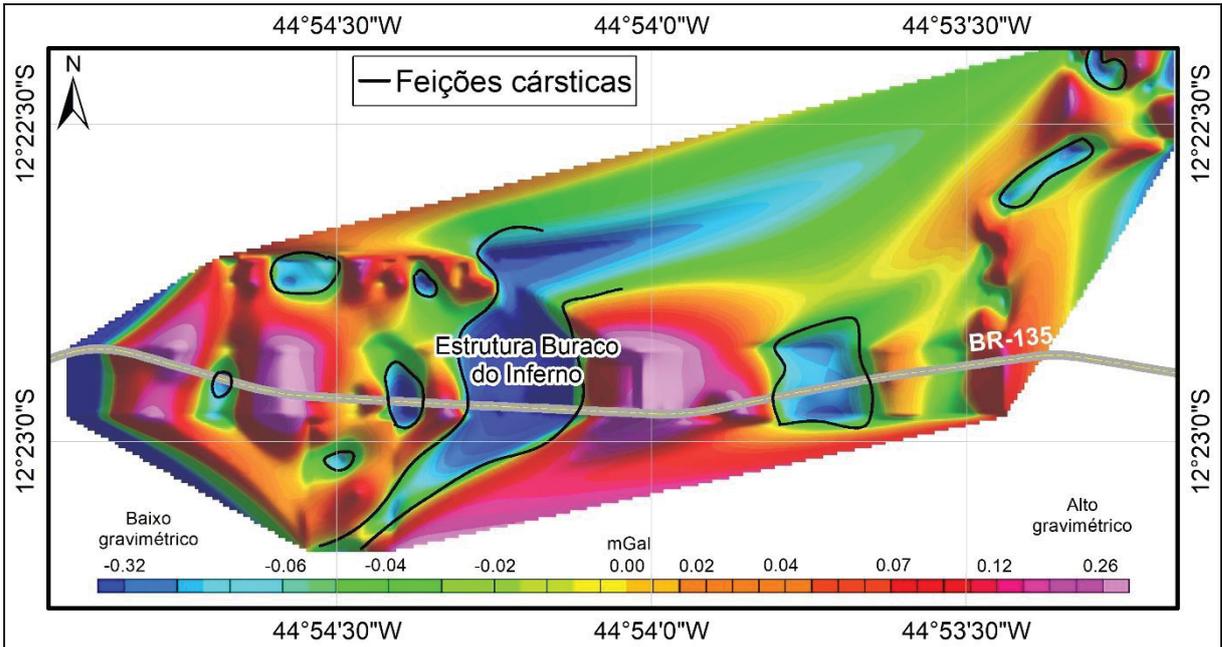
FIGURA 4.1 – MAPA DE ANOMALIAS DE *BOUGUER* COM DELIMITAÇÃO DAS UNIDADES LITOLÓGICAS



Fonte: LPGA/UFPR (2018).

No mapa de anomalia residual de segunda ordem remove-se o efeito regional, e os seus resíduos são mostrados como altos e baixos gravimétricos (FIGURA 4.2). Como as rochas que ocorrem na área de estudo constituem um contexto de características geológicas homogêneo, formado por metacalcários e fina cobertura de arenitos, é de se esperar que os baixos gravimétricos correspondam a vazios no sistema cárstico existente, ou seja, a cavidades em profundidade de origem natural, neste caso associadas às falhas na direção NE.

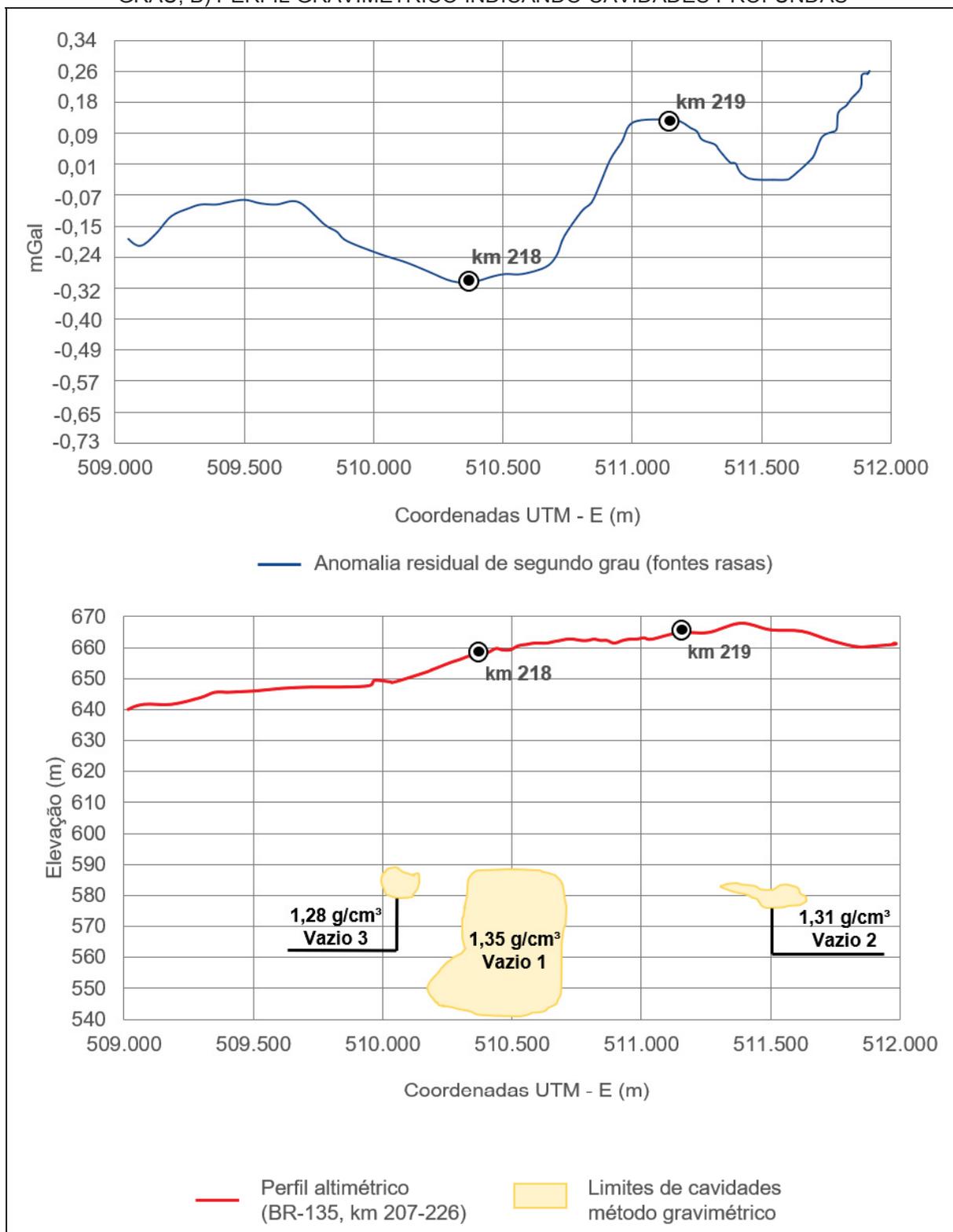
FIGURA 4.2 – MAPA DE ANOMALIAS RESIDUAIS DE SEGUNDO GRAU INDICANDO AS FEIÇÕES CÂRSTICAS DO SUBSTRATO ROCHOSO



Fonte: LPGA/UFPR (2018).

O perfil gravimétrico (FIGURA 4.3) modelado a partir dos dados das anomalias residuais de segunda ordem esboça as principais cavidades existentes entre o km 215 e km 218 do atual traçado da rodovia BR-135/BA. O *software* utilizado calcula o problema inverso da gravimetria (inferir a massa anômala a partir do baixo gravimétrico) e obtém os valores por métodos iterativos (variando-se a área de influência e sua profundidade), resultado em um ajuste que represente o efeito medido.

FIGURA 4.3 – PERFIS GRAVIMÉTRICOS OBTIDOS POR MODELAGEM DAS ANOMALIAS RESIDUAIS DE SEGUNDA ORDEM: A) RESULTADO DA ANOMALIA RESIDUAL DE SEGUNDO GRAU; B) PERFIL GRAVIMÉTRICO INDICANDO CAVIDADES PROFUNDAS



Fonte: ITTI/UFPR (2019).

Os resultados da aplicação deste método mostram três cavidades, duas de pequenas dimensões. A cavidade principal corresponde à projeção do Buraco do Inferno, de profundidade de teto aproximadamente em 70 metros, a partir do leito da estrada. A espessura estimada pelo baixo gravimétrico da cavidade mostrada no perfil modelado é de aproximadamente 300 metros, pois o eixo principal da rodovia neste local é de direção E-W, enquanto a estrutura que controlou o desenvolvimento do Buraco do Inferno é um alinhamento de uma zona de falhas de direção N40-50E. Assim sendo, deve-se considerar como largura da área de influência de anomalia gravimétrica de aproximadamente 200 m de comprimento por 50 m de altura entre o piso e teto da cavidade. Cabe salientar que os vazios identificados podem não ser contínuos, visto que o método não tem resolução para permitir tal grau de discernimento.

Os contrastes de densidade obtidos são compatíveis com o modelo apresentado, isto é, os calcários são da ordem de $2,62 \text{ g/cm}^3$ e a cavidade do Buraco do Inferno é de $1,35 \text{ g/cm}^3$, sugerindo seu preenchimento, em parte, com água e sedimentos.

4.2 RESULTADOS DO USO DO MÉTODO GPR

A partir da interpretação dos perfis de GPR foi possível avaliar a profundidade do perfil de solo, delimitar o topo rochoso da cavidade (paleorelevo), identificar prováveis zonas de fraturamento e de dissolução nos metacalcários.

As possíveis cavidades foram interpretadas como pequenas feições de dissoluções, muitas delas associadas a zonas de faturamento sub-verticais no maciço rochoso.

Vale ressaltar que não foram identificadas nos perfis geofísicos estruturas sugestivas de cavidades de grandes dimensões, até a profundidade máxima de investigação. Esta oscilou entre 6 e 10 m, restrita à penetração do sinal com a antena utilizada, de 270 MHz.

No perfil 9 (FIGURA 1.18), entre as estações 1600 e 1900, no eixo da estação 1720, encontrou-se um conjunto de refletores na zona de profundidade de 5 a 6 metros, sugestivo de existência de um padrão de estruturas tectônicas, em

rochas com maior grau de fraturamento, coincidentes com a projeção da caverna do Buraco do Inferno, segundo os dados topográficos e gravimétricos obtidos em etapas anteriores da pesquisa.

4.3 RESULTADOS DO USO DO MÉTODO POLARIZAÇÃO INDUZIDA E RESISTIVIDADE

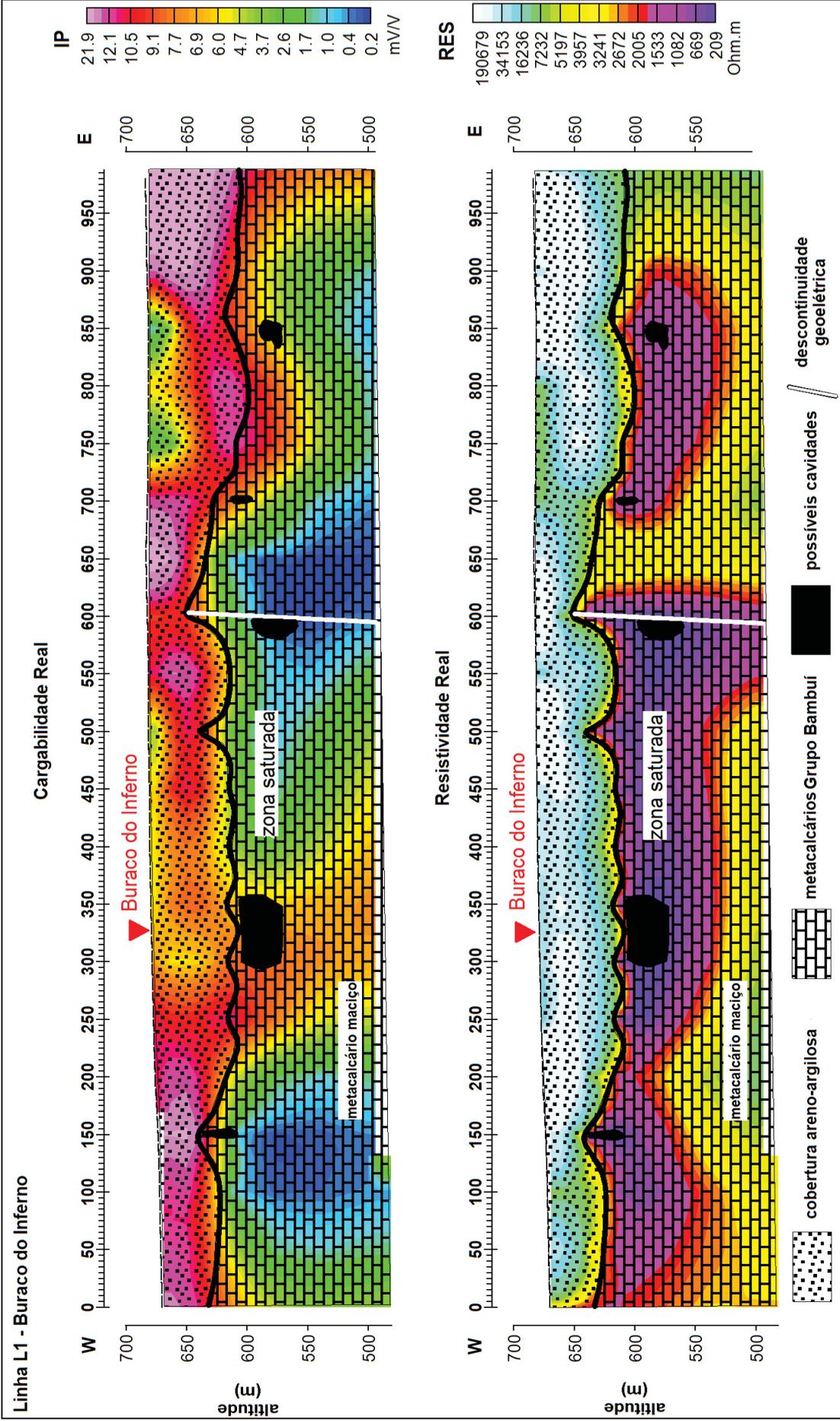
A sequência das figuras (FIGURA 4.4, FIGURA 4.5, FIGURA 4.6 e FIGURA 4.7) corresponde respectivamente aos modelos de profundidade da cargaabilidade real e da resistividade real das linhas L1, L2, L3 e L4.

O painel superior da linha L1 mostra uma zona de cobertura polarizada dada pela cobertura do areno-argilosa em contraste com a feição inferior dos metacalcários do Grupo Bambuí não polarizado, dado pela isocurva de 7 mV/V em praticamente toda a extensão da seção. No painel inferior, é ilustrado um padrão geométrico sub-horizontal reflexo de um estrato de comportamento resistivo constituído por cobertura arenosa com contribuição argilosa, sobreposta a um trato condutivo dos calcários do Grupo Bambuí. Na estação 600 metros é assinalada uma descontinuidade geométrica condutiva, aparentemente sugerindo a ocorrência de cavidades com grau de saturação acentuado, possivelmente conectadas por condutos horizontais. É válido ressaltar que a direção do perfil da linha L1 faz um ângulo de 45° com a estrutura do *Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues*. Como a caverna Buraco do Inferno é parte do sistema, as dimensões das possíveis cavidades mostradas na seção são aparentes.

A linha L2 apresenta no painel superior um extrato com baixos índices de polarização, dada pelo mesmo tipo de cobertura areno-argilosa de pequena espessura, não sendo assinalado em função da escala adotada do modelo. Nos tratos mais profundos ocorre uma zona com polarização mais elevada que se correlaciona aos metacalcários maciços. No painel inferior, a variável da resistividade também mostra um padrão sub-horizontal, cujo contato entre a zona saturada e os metacalcários maciços inferiores ocorre na isocurva de 2000 Ohm.m. No interior da zona saturada foram assinalados cinco locais onde podem ocorrer feições de dissolução, as mais expressivas localizadas nas estações 300 e 400 metros.

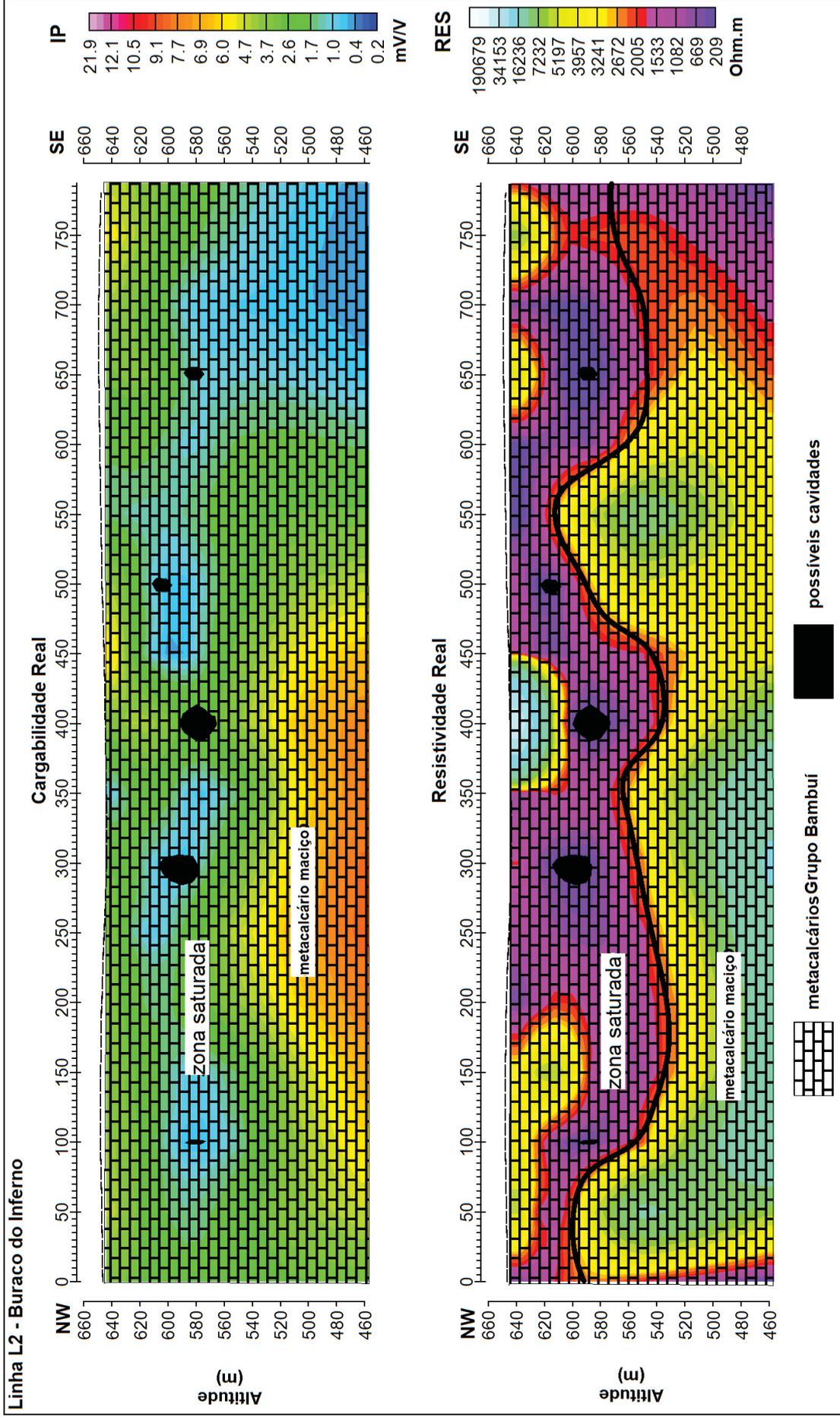
As linhas L3 e L4 exibem um padrão de cargabilidade semelhante, marcado pelo contraste sub-horizontal de tratos polarizados nas camadas superficiais dado pela presença de coberturas areno-argilosas. O contato com os tratos inferiores de baixa cargabilidade dos metacalcários do Grupo Bambuí que ocorre na profundidade média de 50 metros. No painel inferior das duas linhas verifica-se um estrato resistivo que se correlaciona com as coberturas areno-argilosas em contraste com as camadas inferiores condutivas dos metacalcários, provavelmente saturados e com núcleos sugestivos de eventuais feições de dissolução de pequenas dimensões, que apresentaram, neste local, comportamentos mais resistivos nos tratos inferiores dos metacalcários maciços.

FIGURA 4.4 – MODELO DE PROFUNDIDADE DA CARGABILIDADE REAL (PAINEL SUPERIOR) E DA RESISTIVIDADE REAL (PAINEL INFERIOR) DA LINHA L1



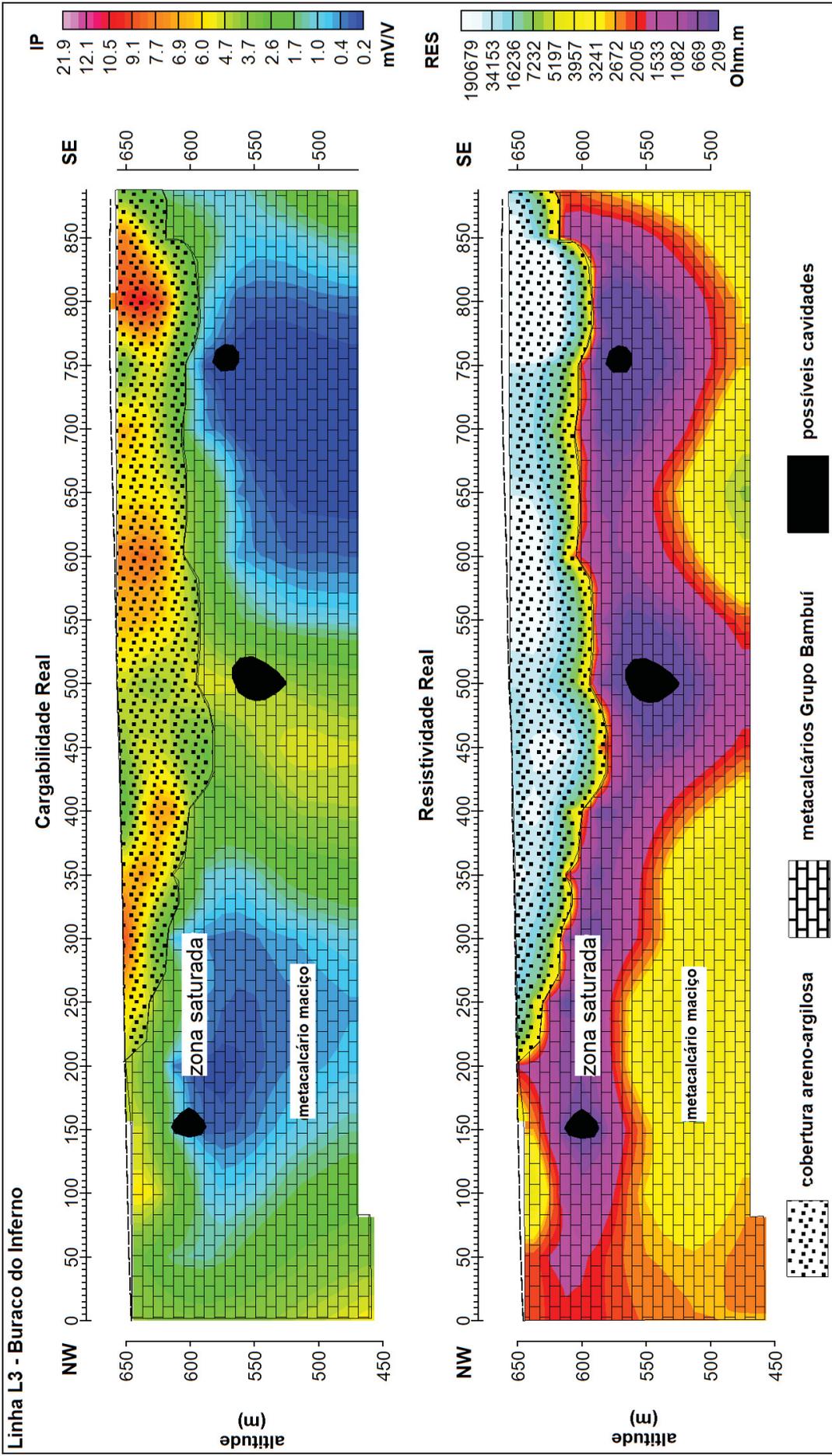
Fonte: LPGAU/UFPR (2017).

FIGURA 4.5 – MODELO DE PROFUNDIDADE DA CARGABILIDADE REAL (PAINEL SUPERIOR) E DA RESISTIVIDADE REAL (PAINEL INFERIOR) DA LINHA L2



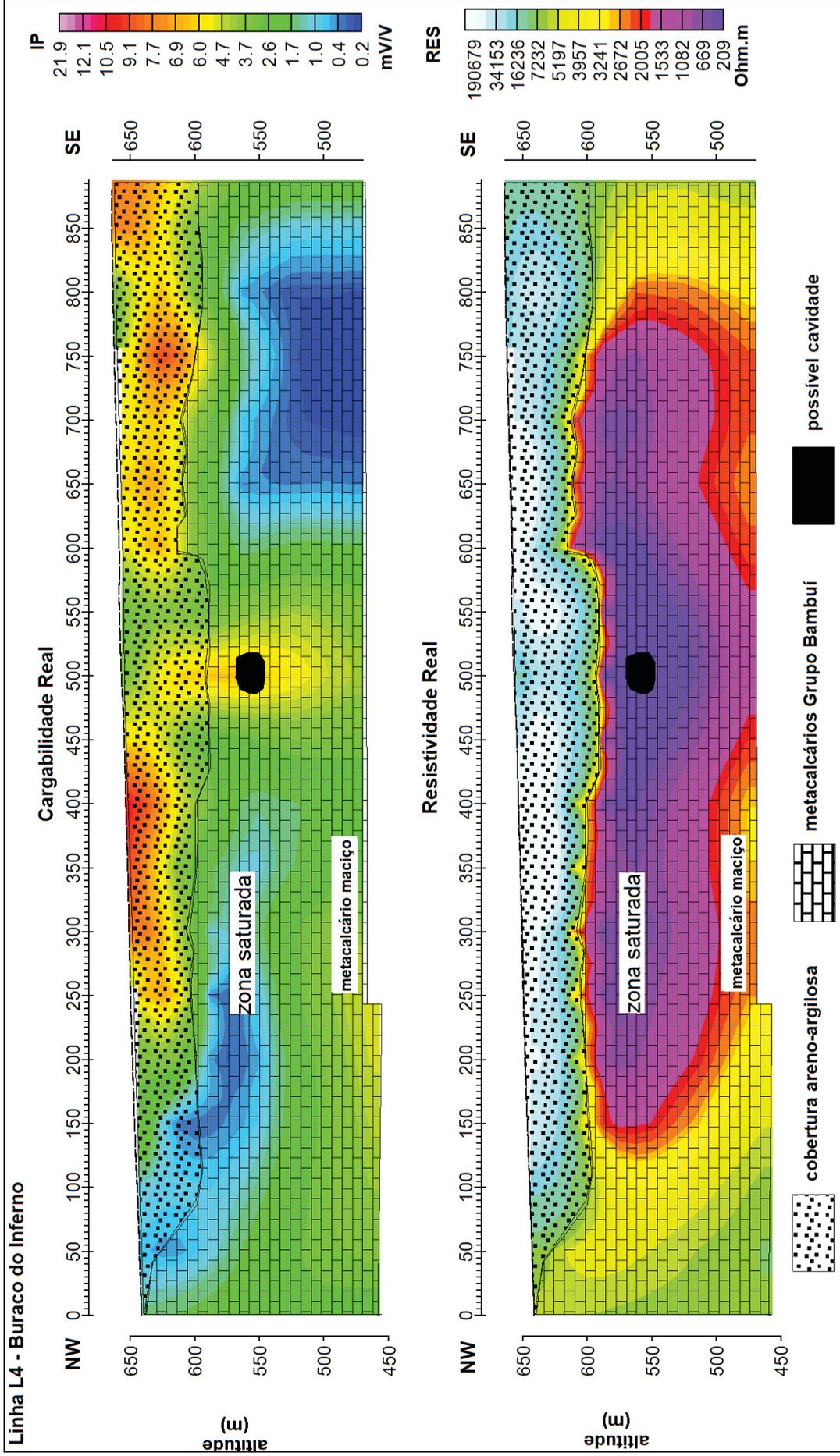
Fonte: LPGAU/UFPR (2017).

FIGURA 4.6 – MODELO DE PROFUNDIDADE DA CARGABILIDADE REAL (PAINEL SUPERIOR) E DA RESISTIVIDADE REAL (PAINEL INFERIOR) DA LINHA L3



Fonte: LPGAUFR (2017).

FIGURA 4.7 – MODELO DE PROFUNDIDADE DA CARGABILIDADE REAL (PAINEL SUPERIOR) E DA RESISTIVIDADE REAL (PAINEL INFERIOR) DA LINHA L4



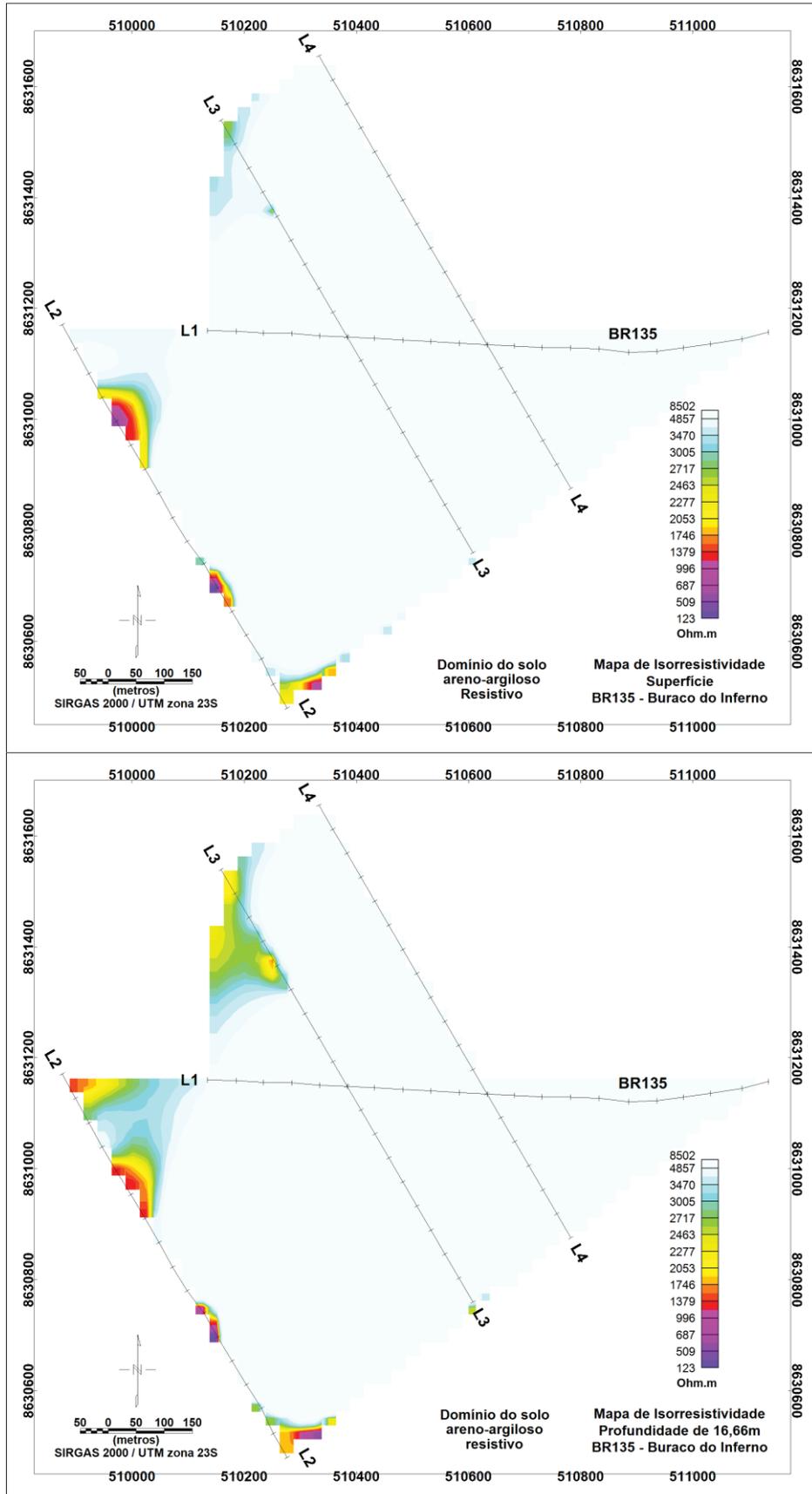
Fonte: LPGAUJFPR (2017).

Os mapas da variação da resistividade real extraída das seções 2D mostradas anteriormente, constituem cortes a partir da superfície (n1 - FIGURA 4.8 A) e nas profundidades de 17 m (n2 - FIGURA 4.8 B), 37 (n3 - FIGURA 4.9), 64 m (n4 - FIGURA 4.9), 96 m (n5 - FIGURA 4.10), 137 m (n6 - FIGURA 4.10) e 188 m (n7 - FIGURA 4.11). Os resultados evidenciam um domínio resistivo homogêneo até a profundidade de 17 metros correspondente à cobertura de solo areno-argilosa, sobre os metacalcários. O domínio do topo do metacalcário mostrando uma queda da resistividade, provavelmente causada pelo limite da zona saturada, na profundidade de 37 metros.

O teto e a base da caverna do Buraco do Inferno foram estimados, com base em variações abruptas de resistividade, nas profundidades de 64 e 96 metros. Os valores de resistividade decaem abruptamente na profundidade do teto, em contraste com o de acima deste local. Na profundidade de 96 metros, interpretada como a base da caverna, o ambiente menos resistivo é mais pronunciado do que próximo ao teto, configurando zona mais saturada, do substrato da caverna.

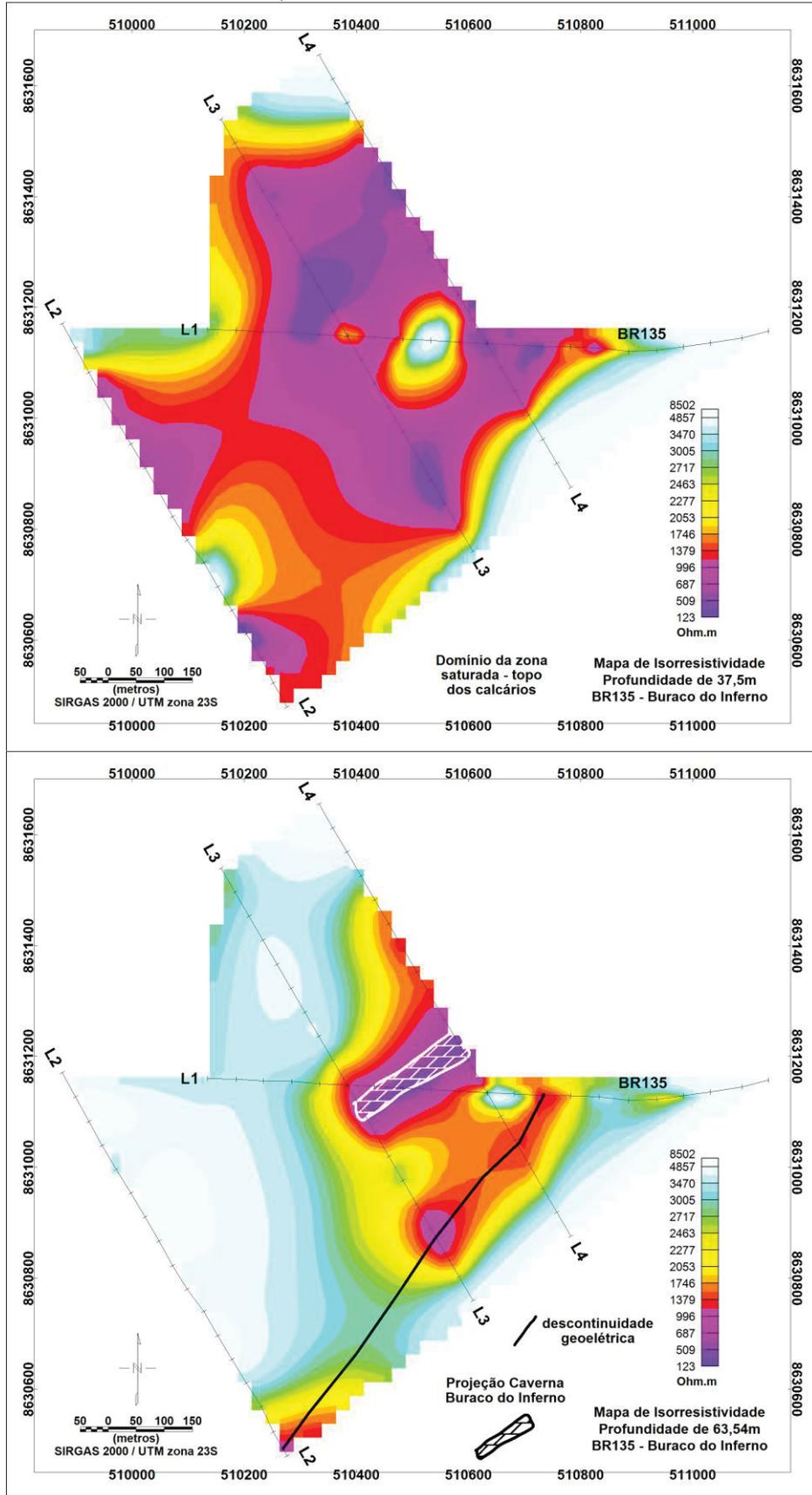
Na profundidade de 188 metros, o meio se torna altamente resistivo e homogêneo em toda área da pesquisa, o que configura um ambiente de metacalcários maciços sem a influência da caverna do Buraco do Inferno ou outros vazios.

FIGURA 4.8 – MAPA DE ISORRESISTIVIDADE. A) NÍVEL N1 SUPERFICIAL; B) NÍVEL N2, PROFUNDIDADE DE 17 m



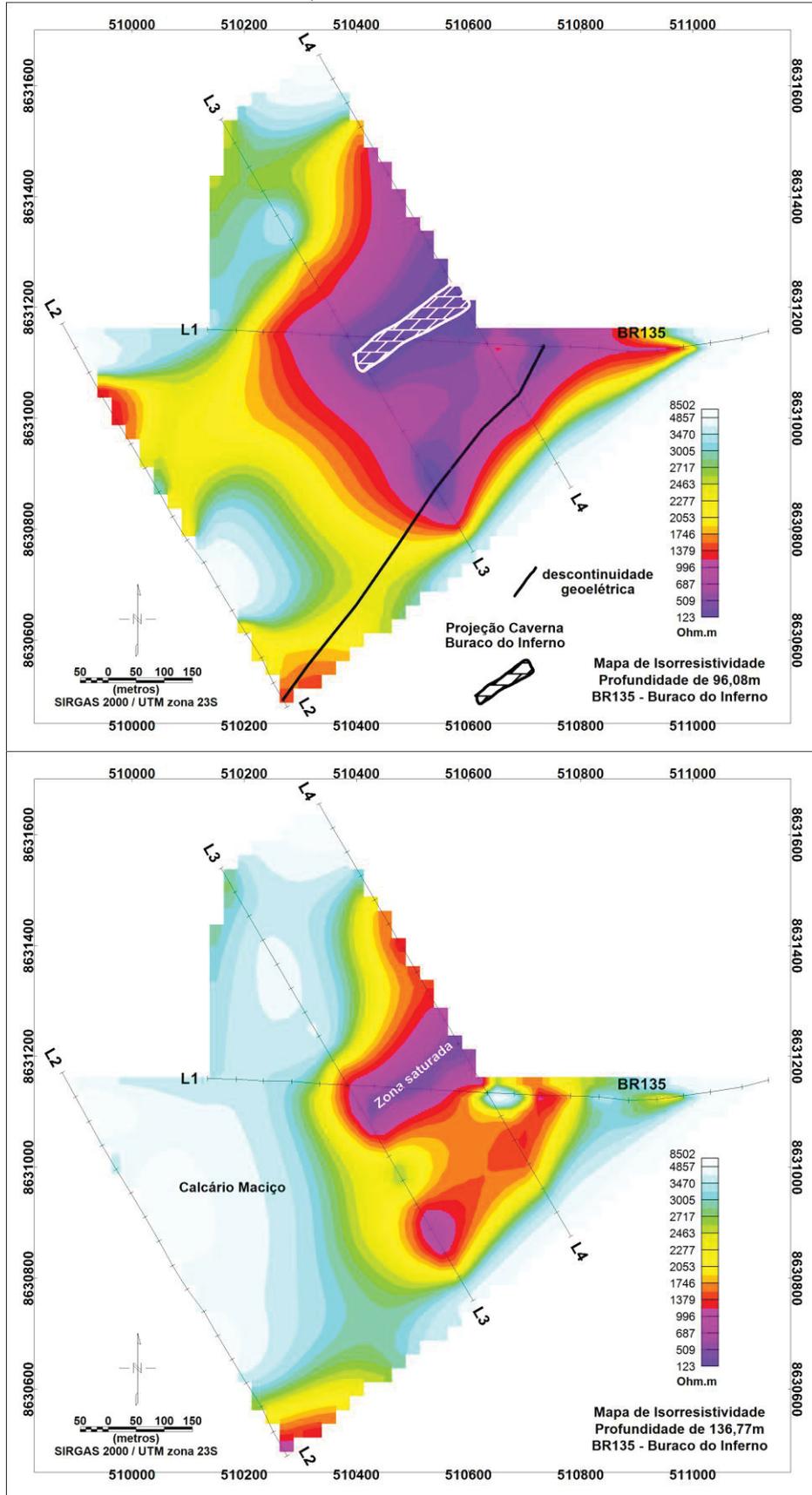
Fonte: LPGA/UFPR (2017).

FIGURA 4.9 – MAPA DE ISORRESISTIVIDADE: A) NÍVEL N3, PROFUNDIDADE DE 37 m; B) NÍVEL N4, PROFUNDIDADE DE 64 m



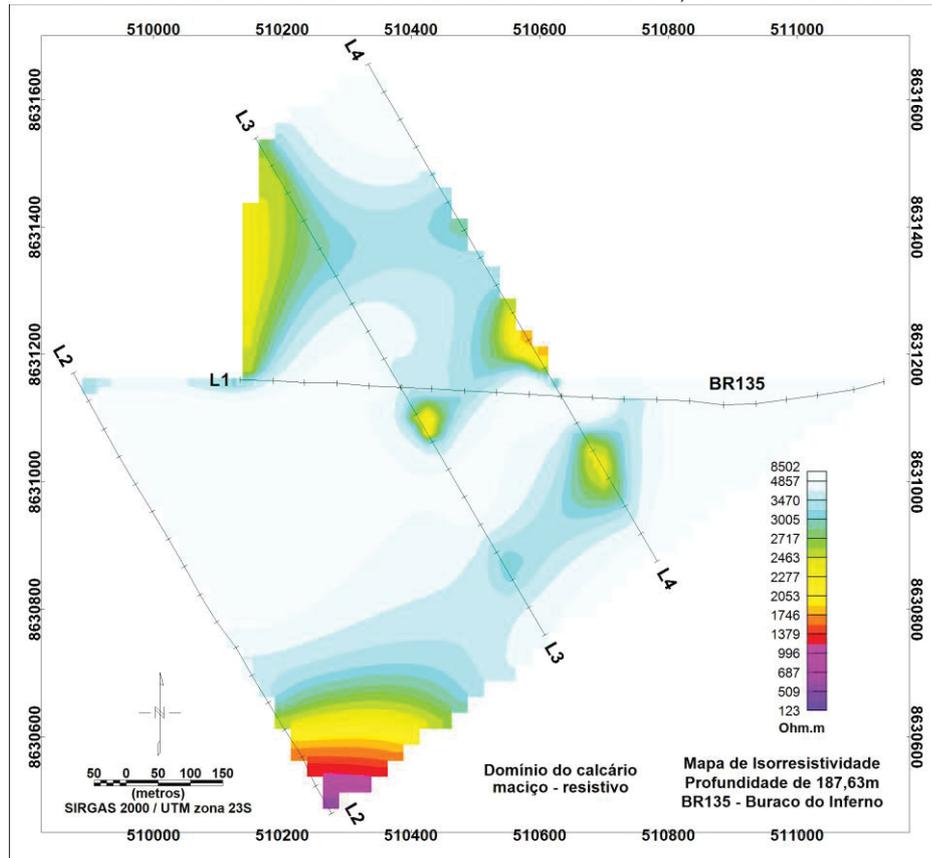
Fonte: LPGA/UFPR (2017).

FIGURA 4.10 – MAPA DE ISORRESISTIVIDADE: A) NÍVEL N5, PROFUNDIDADE DE 96 m; B) NÍVEL N6, PROFUNDIDADE DE 137 m



Fonte: LPGA/UFPR (2017).

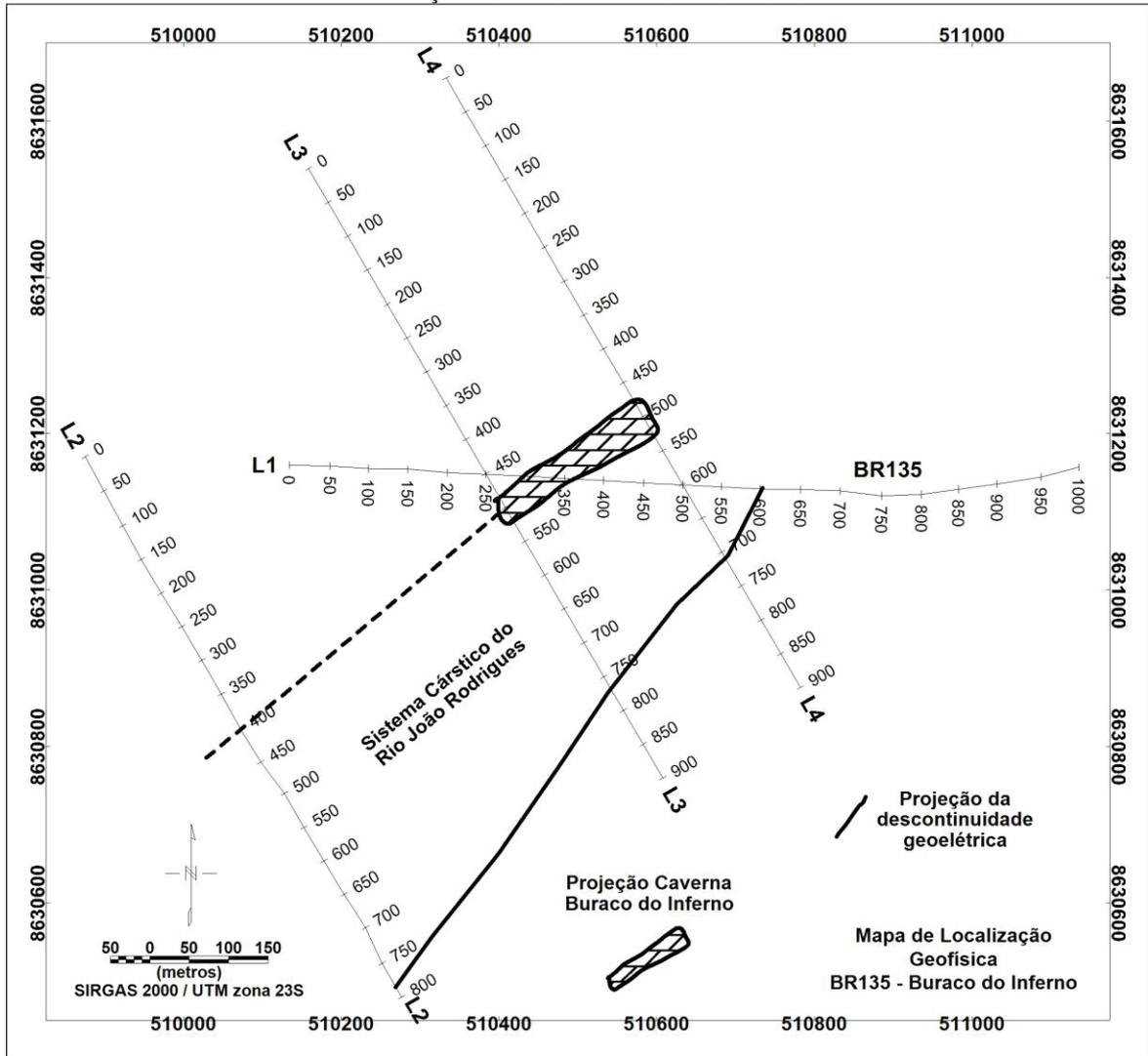
FIGURA 4.11 – MAPA DE ISORRESISTIVIDADE DO NÍVEL N7, PROFUNDIDADE DE 188 m



A projeção da caverna do Buraco do Inferno foi inferida com eixo centrado na estação 500 das linhas L3 e L4 e 325 da linha L1. Outra feição destacada é uma descontinuidade geolétrica de baixa resistividade, a qual pode estar relacionada com feição de dissolução subparalela ao eixo principal da cavidade dentro do Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues (FIGURA 4.12).

Com base nos resultados geofísicos obtidos ao longo da linha L1 e na modelagem 3D realizada por Mnelek *et al.* (2017), constatou-se que a profundidade do teto da caverna do Buraco do Inferno encontra-se a aproximadamente 80 m, conforme descrito na TABELA 4.1, sendo aproximadamente 45 m de arenitos e 35 m de rochas metacalcárias.

FIGURA 4.12 – PROJEÇÃO DA CAVERNA BURACO DO INFERNO, OBTIDA PELO MÉTODO DE VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE REAL



Fonte: LPGA/UFPR (2017).

TABELA 4.1 – DIMENSÕES DA CAVERNA BURACO DO INFERNO OBTIDOS PELO MÉTODO GEOFÍSICO DE POLARIZAÇÃO INVERTIDA E RESISTIVIDADE

ATRIBUTO	ALTITUDE (m)	PROFUNDIDADE (m)
Superfície do Terreno	680	-
Teto	600	-
Base	570	-
Teto	-	80
Largura	-	52
Altura	-	30

Fonte: LPGA/UFPR (2017).

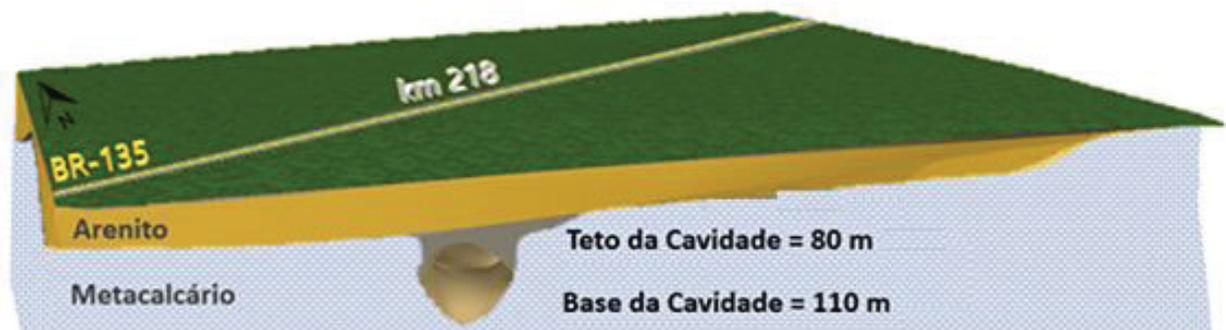
Com as coordenadas tridimensionais obtidas foi possível gerar superfícies correspondentes ao piso e teto da cavidade, assim como à superfície de contato entre os metacalcários e arenitos. Inicialmente foram geradas as curvas de nível correspondentes a cada superfície de interesse, com software *Esri ArcGIS*, posteriormente exportadas para o software *Trimble Sketchup* onde foram geradas as

superfícies, realizados todos os tratamentos visuais e aplicação de texturas, transparências e elementos textuais.

A modelagem tridimensional proveniente da interpretação de dados dos levantamentos da eletrorresistividade proporcionou a estimativa das dimensões da cavidade, assim como a distância do teto da cavidade até a superfície do terreno.

Sobre o eixo da rodovia detectou-se um salão com aproximadamente 52 m de largura por 30 m de altura, e um conjunto de estratos de cobertura de aproximadamente 80 m, medido do teto da cavidade até a superfície do terreno. Destes 80 m, 45 m correspondem a manto de alteração de arenitos, e os 35 m restantes, a metacalcários. A FIGURA 4.13 ilustra o modelo tridimensional desenvolvido.

FIGURA 4.13 – MODELO 3D DA CAVERNA DO BURACO DO INFERN, PROVENIENTE DA INTERPRETAÇÃO DE DADOS DOS LEVANTAMENTOS DA ELETRORRESISTIVIDADE.



FONTE: Mlenek, (2017).

Em síntese, o método utilizando o GPR, devido ao equipamento utilizado, permitiu obter imagens na forma de seção de subsuperfície rasa do terreno, por reflexão de ondas eletromagnéticas de alta frequência. O método gravimétrico avaliou o contraste de densidades do subsolo, permitindo identificar o vazio representado pela cavidade dentro do extrato rochoso. E o método de resistividade e polarização induzida, permitiu discriminar estratos condutivos associados com os metacalcários, com possíveis cavernas (espaços não condutivos).

A partir dos resultados encontrados nos ensaios geofísicos dessa pesquisa é possível concluir que há uma diferença entre os métodos, que diferem entre si, apresentando profundidades aproximadas entre a superfície do terreno (corpo estradal), o teto e o piso da cavidade.

A interpretação dos resultados pelo uso combinado de métodos permitiu estimar a posição, as características geométricas, as dimensões e a profundidades das cavidades em relação a superfície, possibilitando a elaboração de mapas e perfis destas sob o eixo da rodovia projetada.

4.4 DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS

Devido à ausência de norma nacional relativa à potencialidade de danos em estruturas associados à incidência de vibração do tipo contínua e do tipo transiente, buscou-se referenciar os critérios empregados por norma internacional correlata.

A norma alemã DIN 4150-3 (1999) apresenta as diretrizes para a avaliação dos efeitos de vibração em edificações e demais estruturas, tendo sido utilizada como referência inclusive para os limites adotados pela Norma Portuguesa NP-2074 e pela Norma Italiana UNI 9916. Os limites de vibração estabelecidos por esta norma apresentam critérios diferenciados para vibrações transientes e contínuas, bem como considera variações quanto à fragilidade estrutural de edificações.

O limite máximo de velocidade de pico de partícula (VPP) estabelecido pela norma alemã e adotado pelo CECAV, para o caso de vibrações de curta duração, nas direções longitudinal, vertical e transversal, é de 3,0 mm/s, considerando estruturas frágeis como monumentos históricos e edificações de fragilidade estrutural aparente.

A TABELA 4.2 resume os resultados de pico, ou seja, o valor de maior intensidade relativa, de velocidade de vibração de partícula obtidos nos monitoramentos das fontes de vibração transientes (tráfego de veículos) e suas respectivas frequências.

TABELA 4.2 – RESULTADOS DE MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO

DATA	PERÍODO		PONTO	DIST. (m)	LONGITUDINAL		TRANSVERSAL		VERTICAL	
	INÍCIO	FIM			PICO		PICO		PICO	
					(mm/s)	(Hz)	(mm/s)	(Hz)	(mm/s)	(Hz)
01/10	12:25	-	P01	70	0,19	0,5	0,19	0,8	0,13	100
01/10	15:00	-	P02	70	0,13	25	0,19	0,3	0,19	0,4
02/10	10:13	12:00	P03	2	1,21	31,3	1,02	27,8	0,89	19,2
02/10	10:27	12:04	P04	50	0,19	0,4	0,19	0,6	0,13	62,5
02/10	10:38	12:07	P05	150	0,19	0,4	0,25	0,3	0,19	0,4
02/10	10:49	12:08	P06	250	0,38	125	0,44	125	0,19	50
02/10	-	-	P01	cav	0,19	0,5	0,13	125	0,19	0,4
02/10	-	-	P02	cav	0,13	100	0,19	0,3	0,19	0,4
03/10	-	16:11	P01	cav	0,19	0,4	0,19	0,6	0,13	55,6
03/10	13:55	15:39	P07	2	0,95	38,5	0,57	14,3	0,51	21,7
03/10	14:07	15:31	P08	50	0,19	0,5	0,19	3	0,13	25
03/10	14:16	15:34	P09	100	0,19	166,7	0,19	250	0,19	0,4
03/10	-	17:30	P02	cav	0,19	0,6	0,19	0,3	0,19	0,4

Obs.: Apesar de haver dois registros de monitoramentos do dia 1/10, as simulações para medições das intensidades de vibração começaram no dia 2/10. Os sismógrafos foram instalados na parte interna da caverna Buraco do Inferno (cav), sob o eixo da rodovia, no dia 1/10 e ficaram ligados e medindo, sem interrupção, até o dia 3/10.

Incertezas de Medição (U): Canal longitudinal, transversal e vertical = 0,01 in/s (0,254 mm/s).

A incerteza expandida de medição (U) relatada é entendida como a incerteza padrão multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,00$, o qual para uma distribuição t com ν_f (graus de liberdade efetivos) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

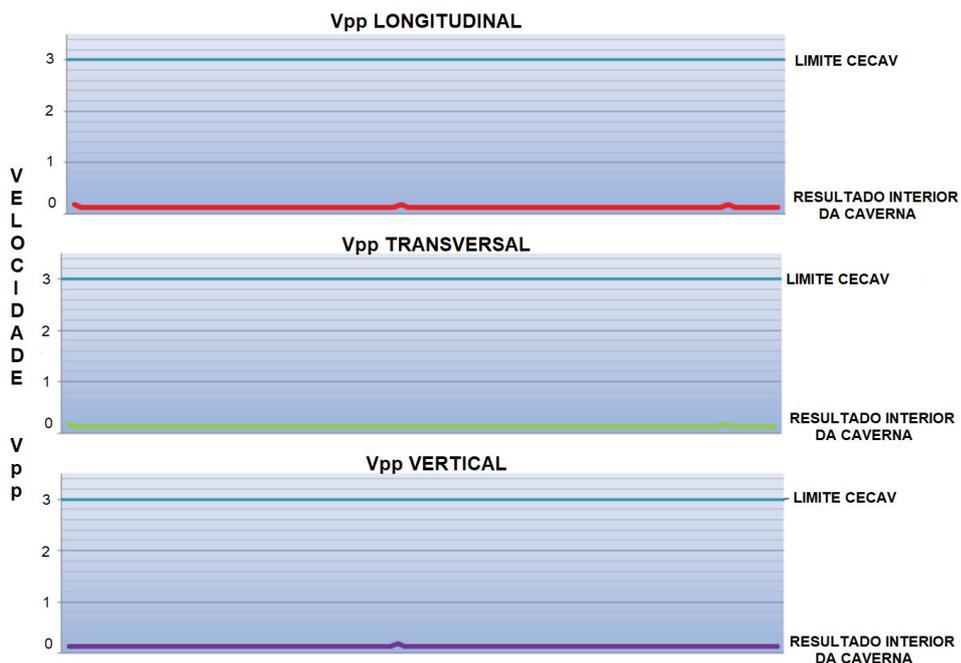
Fonte: Technoblast (2017).

As distâncias referen-se a posição dos geofones em relação ao eixo da rodovia.

Nos gráficos apresentados a seguir, observam-se os registros do monitoramento das fontes de vibração transientes. O eixo horizontal corresponde ao tempo de monitoramento e o eixo vertical à intensidade de vibração (mm/s).

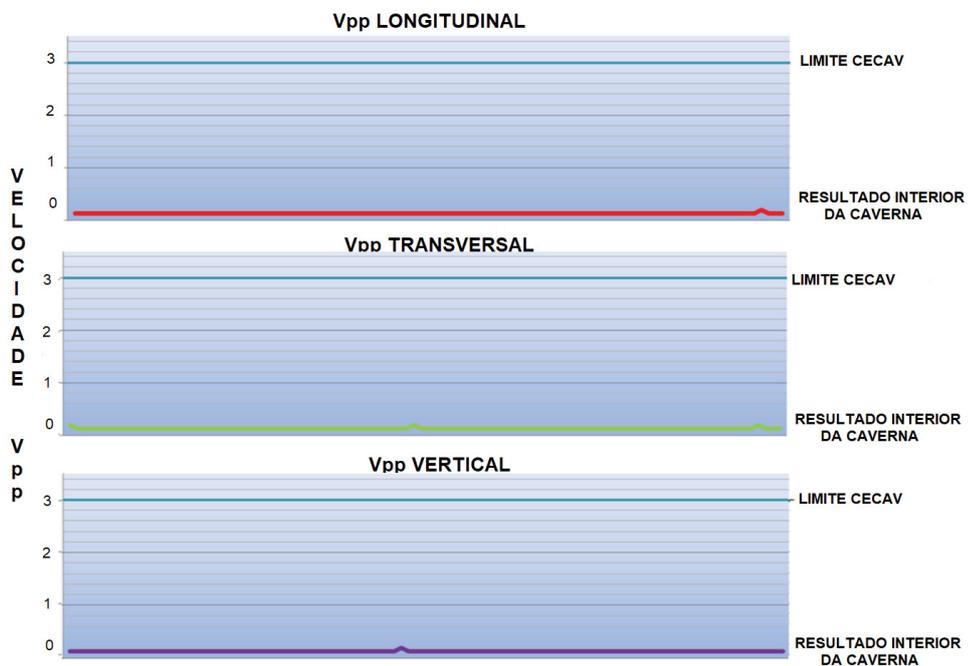
Para os pontos P01 (FIGURA 4.14) e P02 (FIGURA 4.15), localizados na parte interna da caverna Buraco do Inferno, e sob o eixo da rodovia, durante o período dos estudos não foram registrados picos de vibração, indicando que as vibrações geradas pelo tráfego de veículos na rodovia sem pavimentação, foram amortecidas pela espessa camada de cobertura identificada nos estudos geofísicos.

FIGURA 4.14 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P01 (INTERIOR DA CAVIDADE DO BURACO DO INFERNO)



Fonte: o autor (2017).

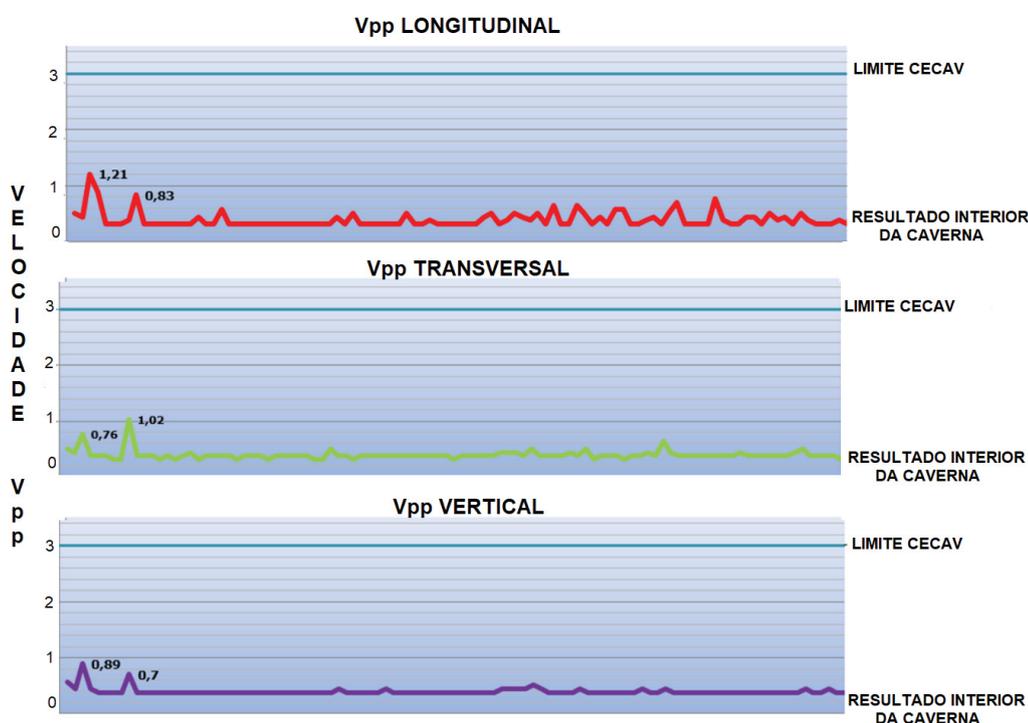
FIGURA 4.15 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P02 (INTERIOR DA CAVIDADE DO BURACO DO INFERNO)



Fonte: O autor (2017).

Nos quesitos da estação P03 (FIGURA 4.16), onde o geofone foi instalado a dois metros da pista de rolamento da rodovia não pavimentada, é possível observar dois picos de vibração em cada canal no início do monitoramento. De acordo com o registro de velocidades, foi observada a passagem de um caminhão às 10:13h, com uma velocidade de 17km/h e outro caminhão às 10:15h, com uma velocidade de 53 km/h, horários em que ocorreram os referidos picos, segundo o registro sismográfico.

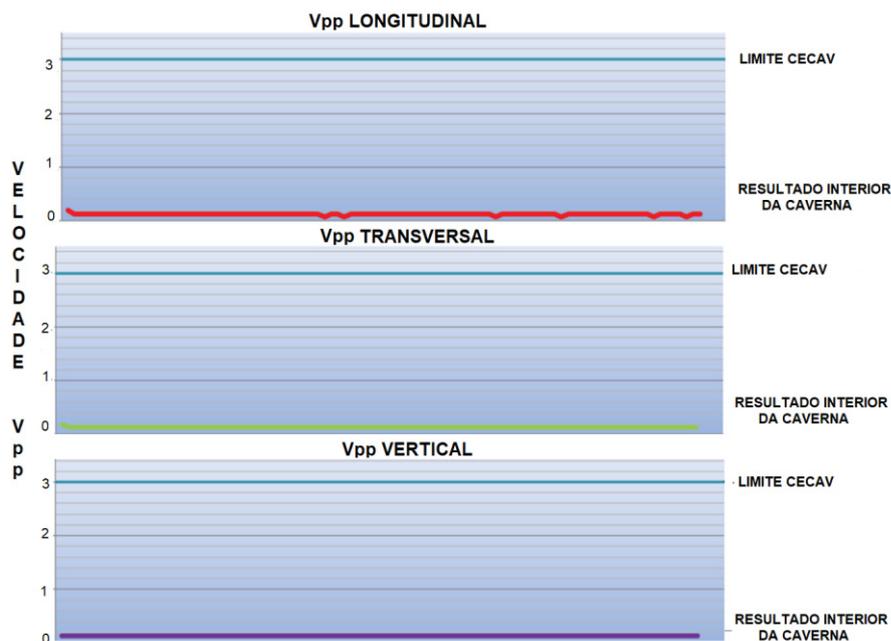
FIGURA 4.16 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P03 (2 m DA RODOVIA)



Fonte: O autor (2017).

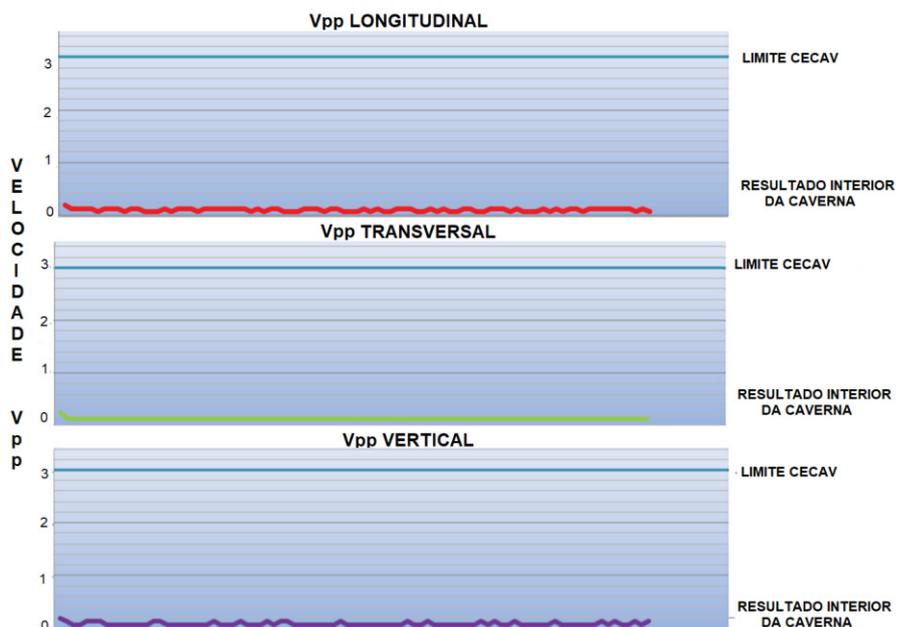
Nas estações P04 (FIGURA 4.17) e P05 (FIGURA 4.18), localizadas respectivamente a 50 e 150 m do eixo da rodovia, não foram registrados picos significativos de vibração.

FIGURA 4.17 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P04 (50 m DA RODOVIA)



Fonte: O autor (2017).

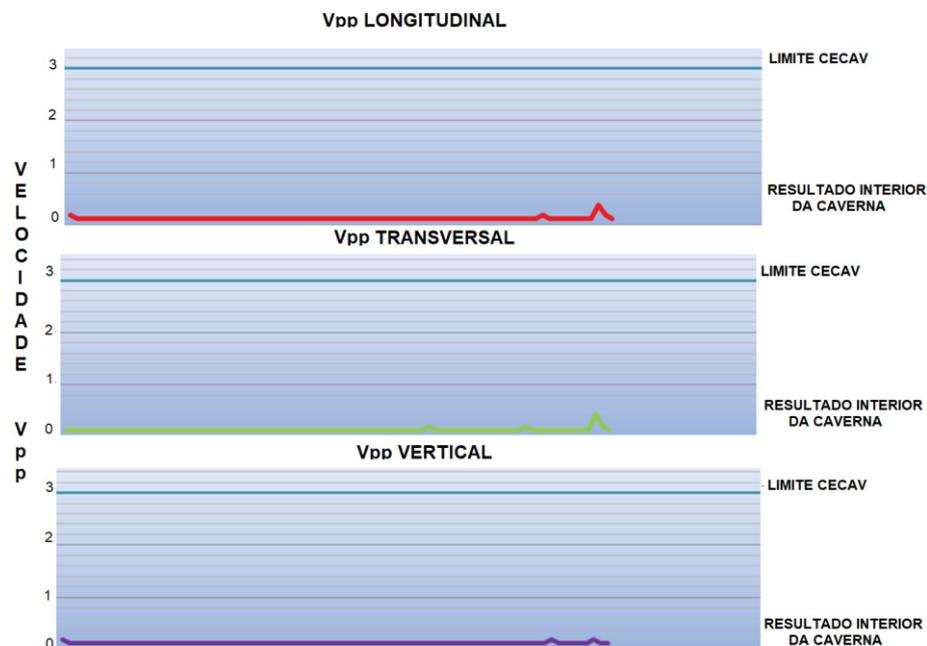
FIGURA 4.18 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P05 (150 m DA RODOVIA)



Fonte: O autor (2017).

Os resultados registrados na estação P06 (FIGURA 4.19), localizada a 250 metros do eixo da rodovia, pode-se observar um pico de vibração de 0,4 mm/s ocorrido as 12:05h. Conforme os dados de velocidade, nesse horário não houve passagem de veículo pelo trecho do trabalho. Tal fato pode ser atribuído à queda de algum galho de árvore, passagem de algum veículo ou algo semelhante.

FIGURA 4.19 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P06 (250 m DA RODOVIA)

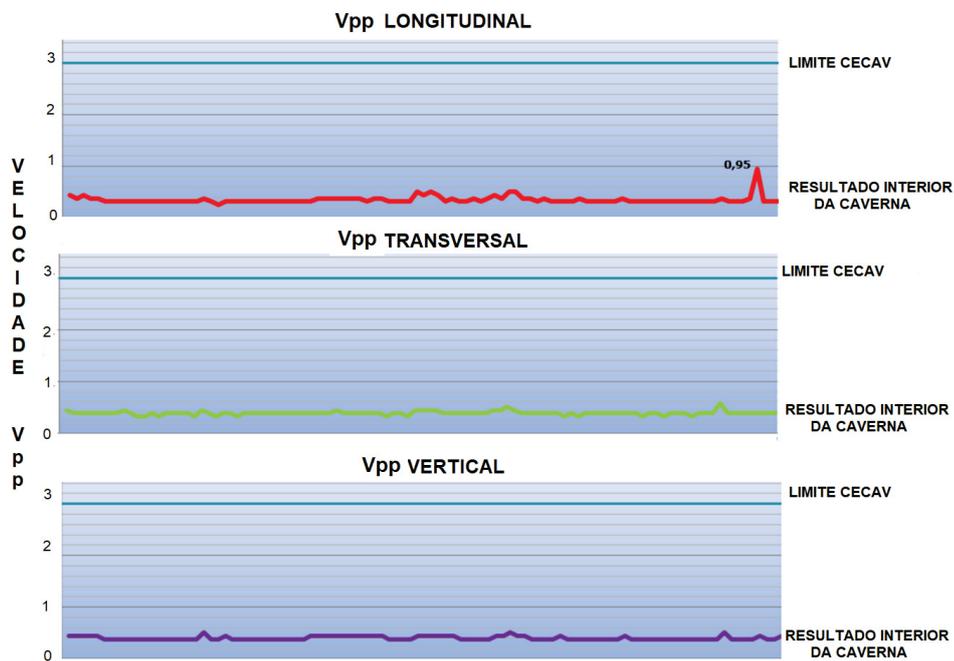


Fonte: O autor (2017).

No dia 3 de outubro, foi definido como referência mais próxima do eixo da rodovia, um local distante aproximadamente 150 m da estação P03. Tal mudança foi realizada a fim de representar a projeção vertical da área de instalação dos sismógrafos dentro da caverna Buraco do Inferno.

Nos mesmos moldes da estação P03, no dia 3 de outubro o sismógrafo da estação P07 foi instalado à margem da rodovia (FIGURA 4.20). É possível observar alguns picos de vibração em cada canal, com destaque para um pico de 0,95 mm/s registrado no canal longitudinal as 15:31h. De acordo com o registro de velocidades foi registrado a passagem de um caminhão nesse horário, com uma velocidade de 43 km/h.

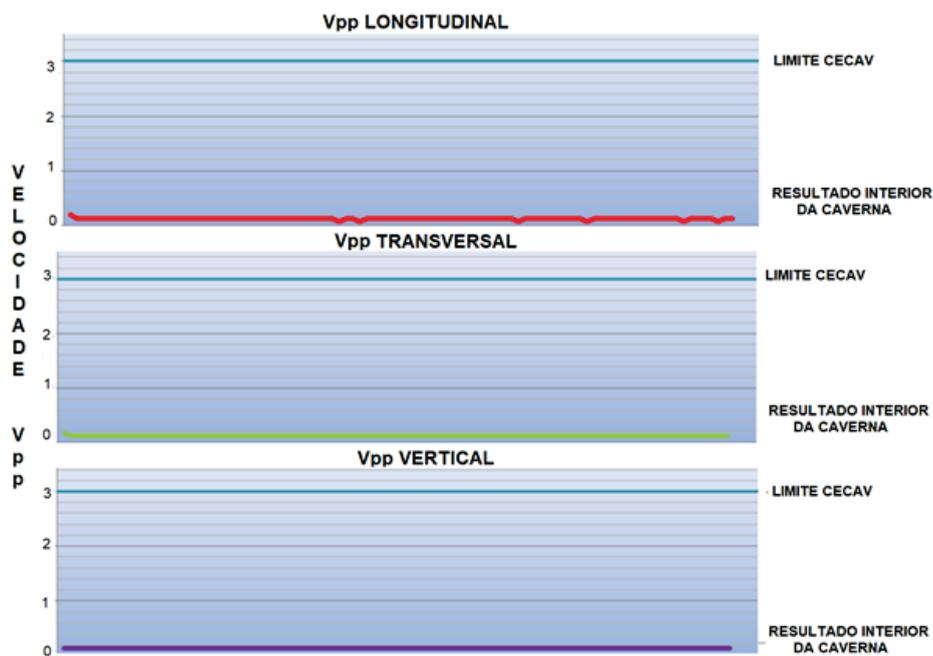
FIGURA 4.20 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P07 (2 m METROS DA RODOVIA)



Fonte: O autor (2017).

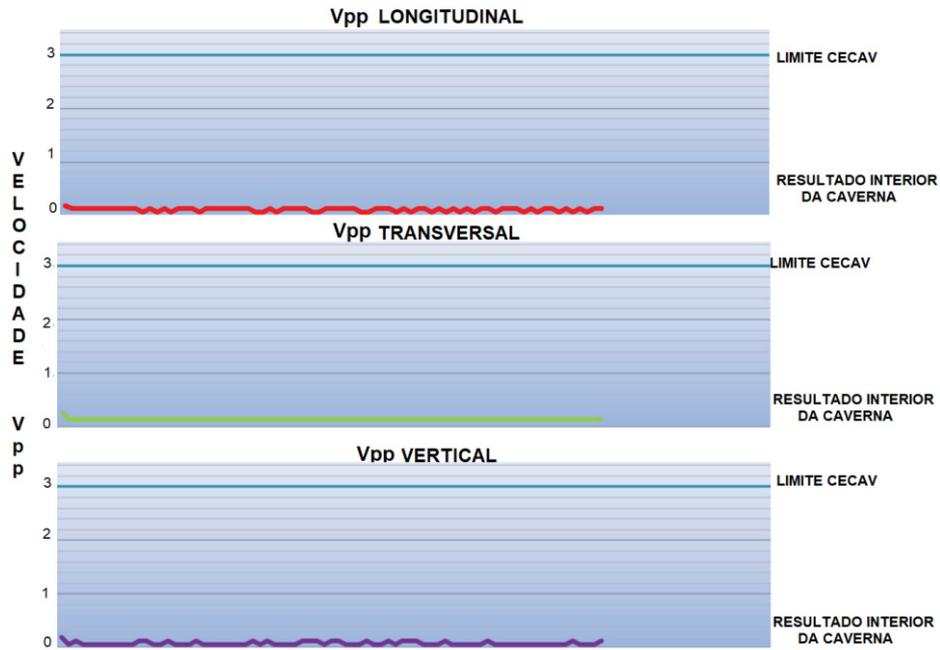
Nas estações P08 (FIGURA 4.21) e P09 (FIGURA 4.22), localizadas respectivamente a 50 e 100 m do eixo da rodovia, não foram registrados picos significativos de vibração.

FIGURA 4.21 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P08 (50 m DA RODOVIA)



Fonte: O autor (2017).

FIGURA 4.22 – RESULTADO DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO NO LOCAL P09 (100 m DA RODOVIA)



Fonte: O autor (2017).

Conforme apresentado, não houve registros significativos de vibração nos pontos de monitoramento. Destacam-se apenas os registros efetuados nas estações P03 e P07 que, por estarem a dois metros de distância da margem da rodovia sem pavimentação, apresentaram picos discretos de vibração, embora os valores de velocidade de partícula de pico estejam abaixo do valor transiente definido pelo CECAV.

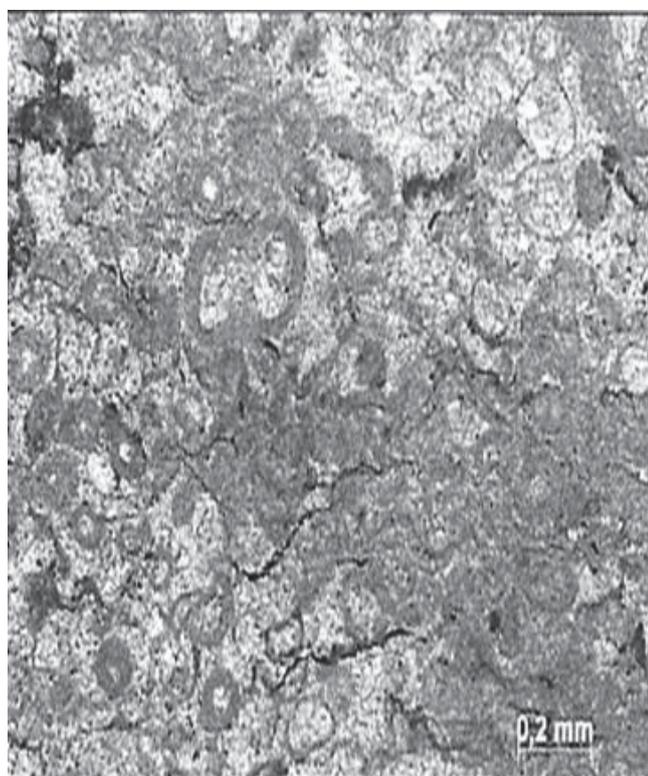
Desta forma, é possível concluir que os valores de vibração gerada pela passagem de veículos, tanto leves quanto pesados, na atual fase de estudos não indicam a possibilidade de provocarem danos estruturais à cavidade do Buraco do Inferno, nem a quaisquer outras situadas em raio entre 50 e 250 m do eixo da rodovia.

Nesse contexto, ressalta-se que os efeitos da vibração devido às possíveis atividades de implantação do empreendimento (desmonte de rochas, compactação de aterros e movimentação de maquinário pesado) devem ser monitorados ao longo das suas execuções.

4.5 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Os metacários têm cor cinza escuro, granulação muito fina a fina. Foram caracterizados no LAMIR/UFPR por microscópica óptica de luz transmitida de seções delgadas, com composição textural estimada visualmente. A rocha é constituída principalmente de calcita, possui discreto bandamento devido à intercalação de lâminas carbonáticas de diferentes granulações (FIGURA 4.23).

FIGURA 4.23 – METACALCÁRIO OOLÍTICO DO GRUPO BAMBUÍ. ARACABOUÇO CONSTITUIDO POR OÓIDES E PISÓIDES, COM ESPAÇOS INTERGRANULARES PREENCHIDOS POR CIMENTO ESPÁTICO FOTOMICROGRAFIA COM POLARIZADORES CRUZADOS OU DESRUZADOS.



Fonte: LAMIR (2015).

4.6 ANÁLISE COEFICIENTE DE POISSON E MÓDULOS DE ELASTICIDADE

Em 2014 foram realizadas análises para determinação da resistência a compressão uniaxial de metacários (FIGURA 4.24) no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Institutos LACTEC). Os ensaios seguiram a norma ABNT

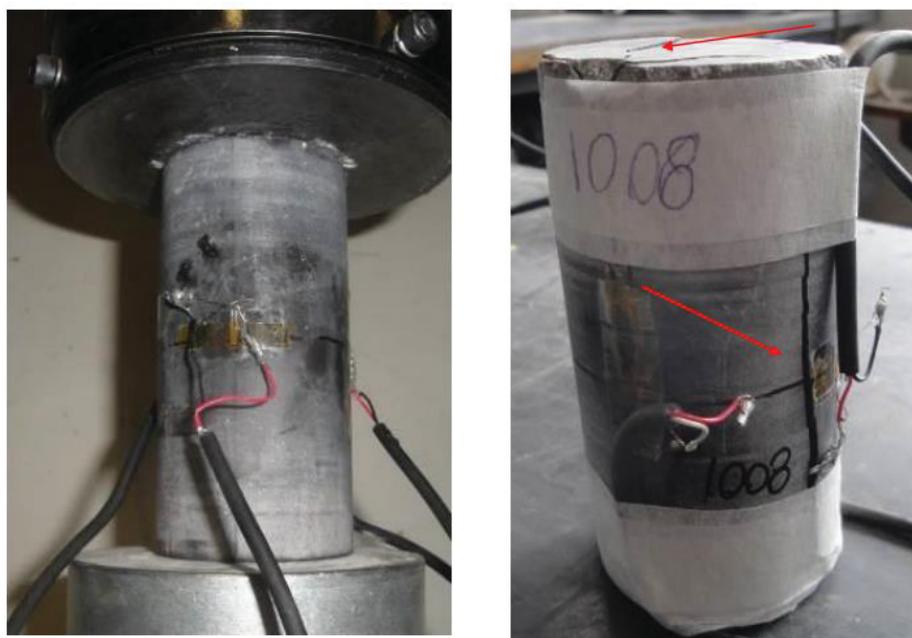
NBR 15845:2010. Também foram realizados, no mesmo instituto, ensaios de determinação do módulo de deformação estático (E) e do diagrama tensão - deformação em rocha matriz, conforme ABNT NBR 10.341:2006 (FIGURA 4.25).

FIGURA 4.24 – CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NA ANÁLISE DE DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE COMPRESSÃO UNIAXIAL.



Fonte: LACTEC (2014).

FIGURA 4.25 – CORPOS DE PROVA POSICIONADOS NO APARELHO DE ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE.



Fonte: LACTEC (2014).

Os resultados obtidos nesses ensaios, expostos na

TABELA 4.3 de forma resumida, apresentam somente os parâmetros necessários para análises desenvolvidas nesta pesquisa, ou seja, o Coeficiente de Poisson, obtido nos ensaios, e Módulo de Elasticidade, obtido a partir de análise de resultados dos ensaios.

Para cada amostra foram realizados entre três a cinco ensaios de compressão e obtenção de Módulo de Elasticidade, e a análise foi feita com os valores máximos, mínimos e médios.

TABELA 4.3 – VALORE DE COEFICIENTE DE POISSON E DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa) DAS AMOSTRAS DE METACALCÁRIOS E SEUS VALORES MÁXIMO, MÉDIO E MÍNIMO.

Amostra	Coeficiente de Poisson	Módulo de elasticidade (MPa)
Amostra 1.1007.14	0,33	59824,56
	0,36	67841,95
	0,37	72062,83
	0,37	73349,32
Amostra 1.1008.14	0,19	61697,42
	0,24	64318,53
	0,26	65750,00
	0,26	64631,73
	0,27	64805,90
Amostra 1.1009.14	0,31	86240,60
	0,24	63655,91
	0,19	45354,84
Amostra 1.1010.14	0,28	79277,11
	0,24	66548,67
	0,32	73306,26
	0,12	67724,55
Valores para calculo		
Média	0,27	66081,64
Máximo	0,37	86240,60
Mínimo	0,12	45354,84

FONTE: LACTEC (2014).

4.7 RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES GEOTÉCNICAS

Os dados obtidos mediante uso conjunto das técnicas de investigação geofísica, permitiram estimar a posição da cavidade Buraco do Inferno sob o eixo da

rodovia BR-135/BA, bem como suas características geométricas, dimensões, profundidade, espessura dos estratos sedimentares, descontinuidades e identificação de contatos geológicos. Além das investigações geofísicas foram testados métodos geotécnicos para calcular segurança estrutural do maciço na seção onde a cavidade intercepta, em profundidade, a projeção da implantação da rodovia na superfície.

A distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas em maciços com cavidades subterrâneas dependem de vários fatores, dentre os quais se destacam a geometria da situação (arranjo espacial das propriedades), ou seja, a forma e a posição da cavidade, sua profundidade e seu preenchimento; a resistência à compressão e a deformabilidade do maciço que, de forma conservativa, pode ser analisado como um meio elástico, portanto, representada pelo Módulo de Deformabilidade (E) e do Coeficiente de Poisson (ν) da rocha encaixante, sendo, então, possível considerar a intensidade da sobrecarga aplicada na superfície, no intuito de se verificar os efeitos da repetição de cargas e da eventual propagação dos efeitos decorrentes de vibrações que possam ocorrer.

Para produzir a análise preliminar foram usados dados obtidos nas análises de Coeficiente de Poisson e Módulos de Elasticidade nos substratos da região e carregamento aplicado a rodovia. Os resultados obtidos em trabalhos desenvolvidos pela equipe do ITTI – Instituto Tecnológico de Transportes e infraestrutura da UFPR, (2014), foram comparados com os resultados obtidos Zampieri, (2017).

Nos cálculos, inicialmente os parâmetros de comportamento dos arenitos foram considerados fixos, enquanto admitiu-se variação dos valores dos parâmetros dos metacalcários. Depois avaliou-se o comportamento dos valores, em condições invertidas. Assim foi possível analisar a sensibilidade e observar qual dos materiais apresentou maiores modificações, no que diz respeito a deslocamentos, deformações e tensões nos pontos previamente escolhidos.

Observou-se uma diferença na distribuição de tensões quando há troca de material: as tensões nos arenitos (camada superior) apresentam uma variação bem mais elevada do que as tensões na rocha calcária (camada inferior). Esse fenômeno ocorre por dois motivos. O primeiro deles – e também o principal – deve-se ao fato de as tensões se dissipam com a profundidade. O segundo deve-se à resistência do material: rocha calcária apresenta um módulo elástico bem mais elevado que os

arenitos e portanto, de acordo com a lei de Hooke, as tensões nesta rocha são menores.

Para realização de simulações, Zampieri (2017) utilizou dois modelos de cavidade, circular e elíptico. Deste modo foi possível verificar a importância de um modelo próximo da realidade e de um modelo mais simples. Com os dados dos modelos separados por pontos, observou-se como variaram os deslocamentos, as deformações e as tensões verticais e horizontais em cada ponto de acordo com a variação dos parâmetros. A variação dos cálculos das variâncias não foi grande, o que demonstrou que mesmo com grande variação dos parâmetros geotécnicos (deformabilidade e tensões aplicadas) não houve resposta em mesma magnitude do comportamento do maciço em profundidade. A autora concluiu que o modelo circular apresentou bons resultados e poderia ser usado para uma análise preliminar para calcular a segurança estrutural do maciço na seção onde a cavidade é interceptada, em profundidade, pela implantação da rodovia na superfície.

Os resultados dos diferentes métodos aplicados na pesquisa correspondem (aplicam-se) a uma fase de caracterização preliminar da questão, à qual deverão seguir-se estudos adicionais como: mapeamento geotécnico das cavidades e seu entorno, determinação precisa de tipos litológicos, sua distribuição e anisotropias, comportamento geomecânico do sistema, estado de alteração do maciço e tipo e frequência de fraturamento (análise estrutural).

É possível quantificar a resistência ou capacidade de carga do maciço, assim como as tensões atuantes na profundidade onde se encontram cavernas. Estudos geotécnicos de resultados quantitativos envolvem a caracterização detalhada do maciço, amostragem e análises laboratoriais sistemáticas, e bem controladas pelas variações litológicas e estruturais (sua representatividade, realização de ensaios in situ, posicionamento espacial das descontinuidades, relação com anisotropias do maciço, instrumentalização e monitoramento). Com uso de malha de amostragem de acordo com as anisotropias de composição, intensidade e direção de fraturamento, grau de intemperismo, com métodos específicos conjugados, que não foram realizados nesta pesquisa.

4.7.1 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES

Dependendo das dimensões e da posição das cavidades os efeitos da sobrecarga, muitas vezes são dissipados no maciço sem provocar deformação ou desenvolvimento de tensões sobre este. Melhor explicando, ocorre uma redistribuição das tensões internas do maciço, de sorte que os acréscimos de tensão em cada ponto podem ser infinitesimais em relação às tensões geostáticas existentes. Nos maciços rochosos, as tensões e as deformações induzidas decrescem com o aumento da profundidade. Com o acréscimo de tensões devido às sobrecargas na superfície pode-se compará-las com resistência de ruptura da rocha, permitindo a avaliação do risco de ruptura a cada profundidade.

Dentre os métodos de análise de acréscimo de tensões, fundamentados em uma análise elástica, utilizou-se o método desenvolvido por Boussinesq (1889), que permite melhor compreensão do fenômeno, para qualquer ponto inserido na área de influência do maciço.

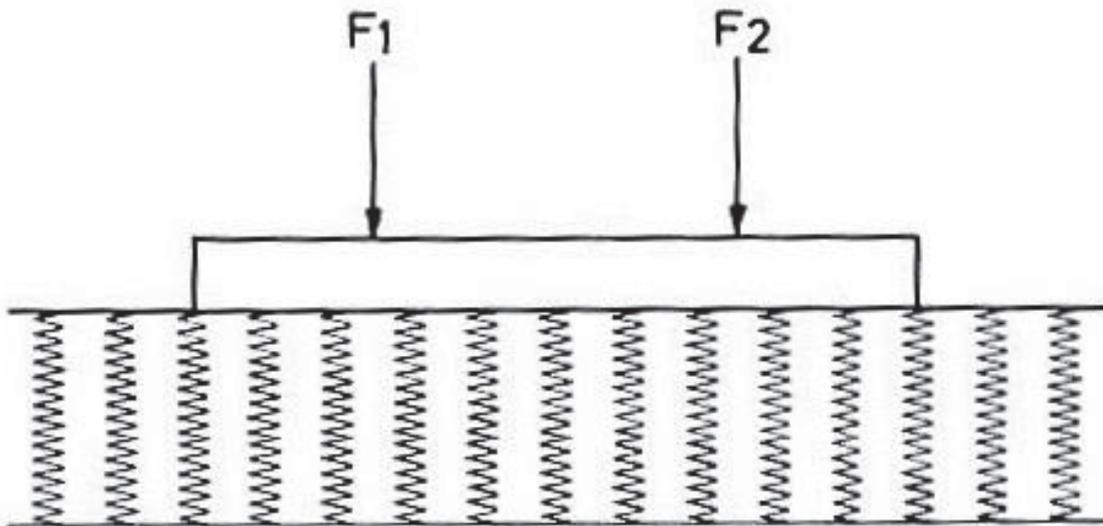
Nas aplicações da engenharia, a determinação de tensões não é o objetivo final, mas um passo necessário no desenvolvimento importante nos estudos para calcular o valor do fator de segurança estrutural. Os modelos de respostas geradas pela sobrecarga são dependentes da rigidez do conjunto e dos módulos de deformação do solo (maciço). Os ensaios realizados permitem a avaliação das possíveis formas de distribuições de tensão de contato, conforme o maciço seja coesivo ou granular. No caso em análise (calcário) pode-se, com segurança, se eliminar as hipóteses de distribuição em solos coesivos, pois não o são. Neste estudo não foram contemplados possíveis fraturas e falhas no meio rochoso.

Diante do arranjo geométrico e características físicas do conjunto, da distribuição da sobrecarga, constituída por uma rodovia que será pavimentada acrescida das cargas móveis do tráfego de veículos, pode-se afirmar que o objeto de análise se comporta como uma faixa de carga vertical de largura finita e com comprimento infinito uniformemente distribuída. Em outras palavras, pode-se imaginar que o acréscimo de tensão vertical da rodovia é semelhante a uma sobrecarga aplicada com largura igual à da plataforma rodoviária (aproximadamente 18 m), apoiada sobre um leito elástico e contínuo, que se de forma em superfície conforme as hipóteses de Winkler, (1867), sobre apoio contínuo sobre molas. E ainda, para esta situação de sobrecargas permanentes (pavimento) e variáveis

(tráfego de veículos) ao longo de um apoio contínuo, simplificada admite-se o observado na FIGURA 4.26 e na FIGURA 4.27.

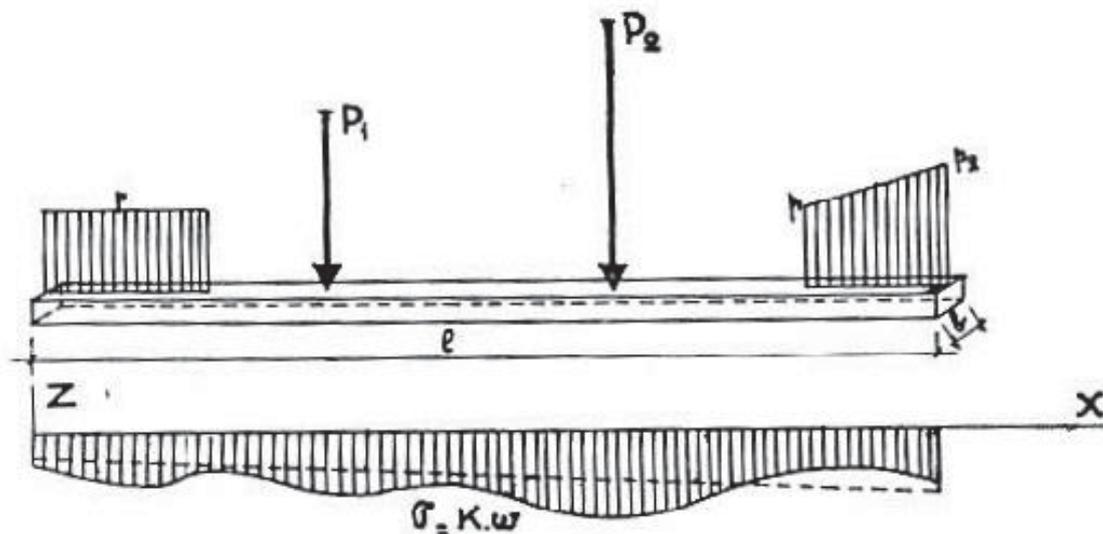
O maciço foi considerado como sendo horizontal na superfície, composto por uma camada de arenitos com espessura de 30 m sotopostas ao metacalcário, sendo que o teto da cavidade está estimado pelo método de eletrorrestividade a uma profundidade aproximada de 80 m a partir da superfície. Além dos já descritos ensaios geofísicos de campo, foram realizados ensaios em laboratório para se determinar as características físicas das rochas, inclusive de sua resistência à ruptura por compressão simples e triaxial.

FIGURA 4.26 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES SOBRE A RODOVIA (MÉTODO DE WINKLER, 1867)



Fonte: Pinto (2006).

FIGURA 4.27 – REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES SOBRE A RODOVIA



Fonte: Pinto (2006).

Para se equacionar matematicamente o problema, em um meio elástico admite-se que o substrato se deforma em decorrência dos acréscimos de tensão a cada profundidade e, obviamente, dependendo da maior ou menor compressibilidade do maciço. Desta forma, ao se aplicar uma carga na superfície do terreno, a distribuição das tensões no substrato não se dá unicamente segundo a projeção desta, mas, elas diminuem com a profundidade em decorrência de que a área afetada pela sobrecarga aumenta com a profundidade. Se unirmos os pontos que representam o mesmo percentual da sobrecarga, definem-se os chamados “bulbos” de distribuição de tensões.

Com base em diversos ensaios de laboratório, com vários tipos de solos e para simplificar esse cálculo, considera-se que a dissipação da sobrecarga ao longo da profundidade (z) se dá de forma simétrica e segundo planos definidos. Seguindo esse raciocínio da análise elástica e aplicando-se o Método de Boussinesq, (1887), podem-se determinar os acréscimos de tensão em qualquer ponto do maciço em análise. O método determina o acréscimo da tensão vertical $q(z)$ a uma profundidade (z), provocada por uma sobrecarga uniformemente distribuída na superfície (q), com largura (b) e comprimento infinito,

Para o caso analisado, em que a espessura do maciço sobre a cavidade tem cerca de 80,0 m, conforme resultado obtido nos ensaios geofísicos, ainda, que a sobrecarga que é dada pelo peso do aterro que configura a plataforma de terraplanagem e o pavimento (q_1), com 2,0 m de altura e largura de 18,0 m de projeção, além de uma carga de multidão (q_2) móvel de 0,6 tf/m², tem-se:

$$\begin{aligned} q &= q_1 + q_2 \\ q &= g \cdot h + q_2 = (2,2 \cdot 2,0) + 0,6 = 5,0 \text{ tf/m}^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

De acordo com a geometria do maciço (FIGURA 4.18), pode-se avaliar o acréscimo de tensões “ $q_{(z)}$ ” na profundidade “ z ”, decorrente da sobrecarga aplicada na superfície, através da seguinte expressão:

$$q_{(z)} = \frac{q}{PI} \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) \cdot (\theta_1 + \theta_2) - \left(\frac{B_1}{B_2} \right) \cdot \theta_2 \right] \quad (4.2)$$

Onde:

$$PI = 3,14158265$$

q = sobrecarga aplicada na superfície (aterro + carga de multidão)

$B1$ e $B2$ = dimensões (em m)

$\Theta1$ e $\Theta2$ = ângulos (em radianos)

Sendo:

$$\Theta1 = (\text{arc tg } (B1 + B2)/z) - (\text{arc tg } (B1/z))$$

$$\Theta2 = \text{arc tg } (B1/z)$$

Assim, considerando-se os acréscimos de tensões atuantes ($q(z)$), na profundidade “z”, decorrentes da aplicação de cargas aplicadas na superfície correspondentes ao aterro de até 2,0 m de altura (q_1), somadas a uma carga móvel (q_2) e, ainda, os limites possíveis de valores de ruptura (q_a) para as camadas de arenito (= 22,03 tf/m²) e de rochas metacalcárias (= 62,08 tf/m²), obtidos por ensaios de ruptura em corpos de prova destas rochas que compõem o maciço, obtém-se os Coeficientes de Segurança (FS) para um diversas profundidades até o topo da cavidade, conforme apresentados no QUADRO 4.1.

QUADRO 4.1 - VALORES DE COEFICIENTE DE SEGURANÇA (F.S.) DE RUPTURA E PROFUNDIDADE CARGA APLICADA (Q) NA SUPERFÍCIE DE 5,0 TF/m² (50 KPA) NA VERTICAL SOBRE A CAVERNA

Profundidade (m)	$\Theta1$ (rad)	$\Theta1$ (rad)	$q(z)$ (tf/m ²)	$q(a)$ (tf/m ²)	Fator de segurança $q(a)/q(z)$
05	0,5232	0,5404	2,1090	22,03	10,44
10	0,4414	0,2914	1,5174	22,03	14,52
20	0,2740	0,1488	0,8909	22,03	24,72
30	0,1918	0,0996	0,6163	22,03	35,74
40	0,1465	0,0748	0,4686	62,08	132,48
50	0,1182	0,0599	0,3775	62,08	164,45
60	0,0989	0,0499	0,3154	62,08	196,83
70	0,0857	0,0428	0,2726	62,08	227,73
80	0,0750	0,0375	0,2387	62,08	260,05

Fonte: O autor (2020)

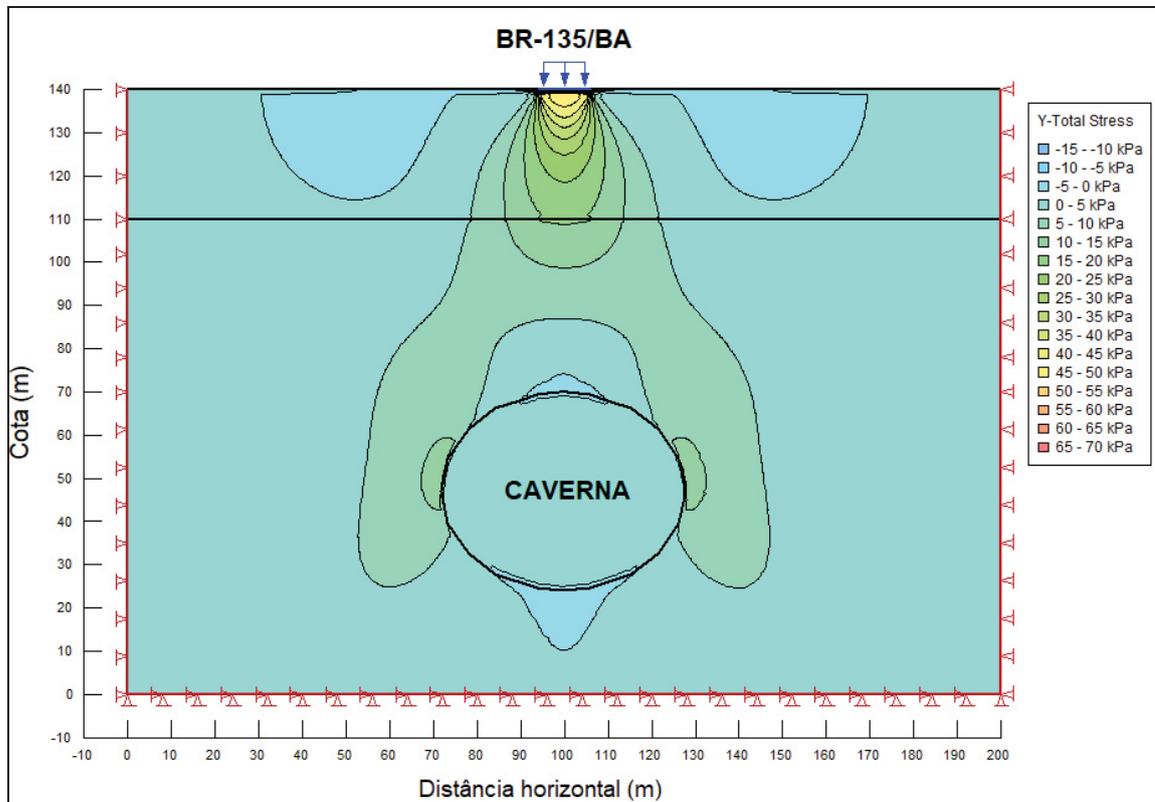
Conforme se observa, considerando-se os acréscimos de tensões calculadas $q(z)$ para os pontos situados na vertical do centro da sobrecarga, e sobre o eixo da caverna existente, com profundidade medidas a partir da superfície (z), o Coeficiente de Segurança contra a ruptura (FS) assume valores de mais de 10 (na profundidade de $z = 5,0$ m), atingindo 260 (no topo da caverna $z = 80,0$ m).

Portanto, nesta avaliação concluiu-se que, ante a sobrecarga máxima aplicada (q) na superfície, no valor de $5,0 \text{ tf/m}^2$, que os riscos de ruptura e colapso da cavidade são baixos. Na camada de arenitos, que corresponde aos primeiros 30 m de profundidade, o coeficiente de segurança à ruptura variou entre 10,44 e 35,74, enquanto que na camada de metacalcários estes valores variaram entre 132,40 (aos 40 m de profundidade) e 260,05 no topo da caverna (aos 80 m de profundidade).

Ainda, analisando os resultados numéricos da análise geotécnica apresentada, observa-se que o acréscimo de tensão na profundidade de 80 m, portanto, no teto da caverna, resultou em um valor de $0,2387 \text{ tf/m}^2$, ou seja, de $23,7 \text{ gf/cm}^2$.

Tais valores numéricos também foram corroborados pelos estudos de Zampieri (2017), que considerando o substrato estratificado, composto por arenitos nos primeiros 30 m e por metacalcários abaixo desta profundidade, analisou as tensões e deformações distribuídas em uma seção vertical, com a cavidade. A autora conclui que, em função do carregamento estimado para a rodovia (aterro + cargas móveis), o acréscimo de tensões e as deformações distribuídas no entorno da cavidade é irrisório (FIGURA 4.28).

FIGURA 4.28 – VARIAÇÃO CALCULADA DE TENSÕES SOBRE NO MACIÇO E CAVIDADE CONSIDERANDO-SE A APLICAÇÃO DA SOMA DAS CARGAS DO MAIOR EQUIPAMENTO CONSTRUTIVO, PAVIMENTO E ATERRO



Fonte: Zampieri (2017).

Os resultados dos levantamentos geofísicos corroboram as informações geológicas e geomorfológicas caracterizadas anteriormente e, mais especificamente, caracterizaram a caverna denominada Buraco do Inferno, permitindo definir com maior assertividade a espessura e os limites das camadas de rochas areníticas e carbonárias do terreno.

O levantamento gravimétrico, realizado entre os km 215 e 218, permitiu identificar três vazios subterrâneos interpretados como cavidades, duas de pequenas dimensões, e outra maior, que se corresponde ao Buraco do Inferno. A análise gravimétrica indicou uma anomalia correspondente a uma cavidade de aproximadamente 50 m de altura, com teto a uma profundidade de aproximadamente 70 m em relação a superfície do terreno.

Os resultados de perfilagem por polarização induzida e eletrorresistividade, na zona de influência da caverna do Buraco do Inferno, permitiram investigar profundidades maiores e corroboraram os resultados obtidos pelo método

gravimétrico. Detectou-se uma cavidade em seção de cobertura com teto a aproximadamente 80 m da superfície do terreno. Desta seção, aproximadamente 45 m correspondem ao manto de alteração de arenitos, por sua vez, sobrepostos a 35 m de metacalcários. Com a modelagem tridimensional dos dados de eletrorresistividade foi possível obter a posição e dimensões da cavidade situada abaixo do eixo projetado da BR-135/BA, com acuidade e resolução mais apurada que o método gravimétrico.

Observa-se que o emprego conjunto destas técnicas de investigação geofísica permitiu estimar a posição do elemento de patrimônio espeleológico, suas características geométricas, dimensões, profundidades, espessura dos estratos sedimentares, descontinuidades e identificação de contatos geológicos, dentre outras características que podem orientar a elaboração de projetos rodoviários (NASCIMENTO NETO, 2016).

O uso de métodos geofísicos em projetos de construção de estradas sobre áreas com alto potencial espeleológico apresenta vantagens, principalmente quando comparados aos métodos de investigação de subsuperfície, como sondagens e escavações. A natureza não invasiva e não destrutiva dos métodos geofísicos, é uma delas, já que preservação das cavidades investigadas é sempre almejada e determinada por legislação ambiental. Outro benefício do uso de métodos geofísicos é a rapidez de aquisição dos dados em campo. Sua utilização possibilita aumentar a área de cobertura dos levantamentos, pois perfis ou linhas geofísicas podem investigar áreas contínuas mais extensas, com relativo detalhe, reduzindo a subjetividade e ambiguidades dos modelos de interpretação.

Os resultados obtidos em estudos de caracterização de alguns parâmetros geotécnicos do maciço rochoso mostraram-se úteis, quando integrados aos geofísicos. Permitiram a avaliação preliminar de riscos de danos e proposição de formas de conservação, incluindo simulações de atividades de construção da rodovia. Possibilitaram ainda calcular a distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas ao maciço rochoso para determinação do limite de segurança estrutural do patrimônio espeleológico (NASCIMENTO NETO *et al.*, 2017).

Quantificar a resistência ou capacidade de carga do maciço, assim como as tensões atuantes na profundidade onde se encontram cavernas requer análises sistemáticas e de detalhe. Estudos geotécnicos de resultados quantitativos são complexos e envolvem caracterização detalhada do maciço, amostragem e análises

laboratoriais sistemáticas, e bem controladas pelas variações litológicas e estruturais (sua representatividade, realização de ensaios in situ, posicionamento espacial das descontinuidades, relação com anisotropias do maciço, instrumentalização e monitoramento). Com uso de malha de amostragem de acordo com as anisotropias de composição, intensidade e direção de fraturamento, grau de intemperismo, com métodos específicos conjugados, que não foram realizados nesta pesquisa.

5 ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE

A área de influência da implantação da rodovia BR135- BA/MG, no trecho entre o km 207 ao km 226, situa-se no bioma Cerrado, o segundo maior bioma da América do Sul, e que ocupa área de 2.036.448 km², correspondente a 22% do território nacional (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2018). Ocorre em onze estados e também se expande para partes da Bolívia e do Paraguai. Por sua localização, se limita com todos os demais biomas de terras baixas da América do Sul, e apresenta uma grande diversidade de paisagens. Essa diversidade é constituída por diferentes tipos de vegetação e por distintos padrões de composição florística em mesma fitofisionomia (FELFILI; SILVA JÚNIOR, 2005).

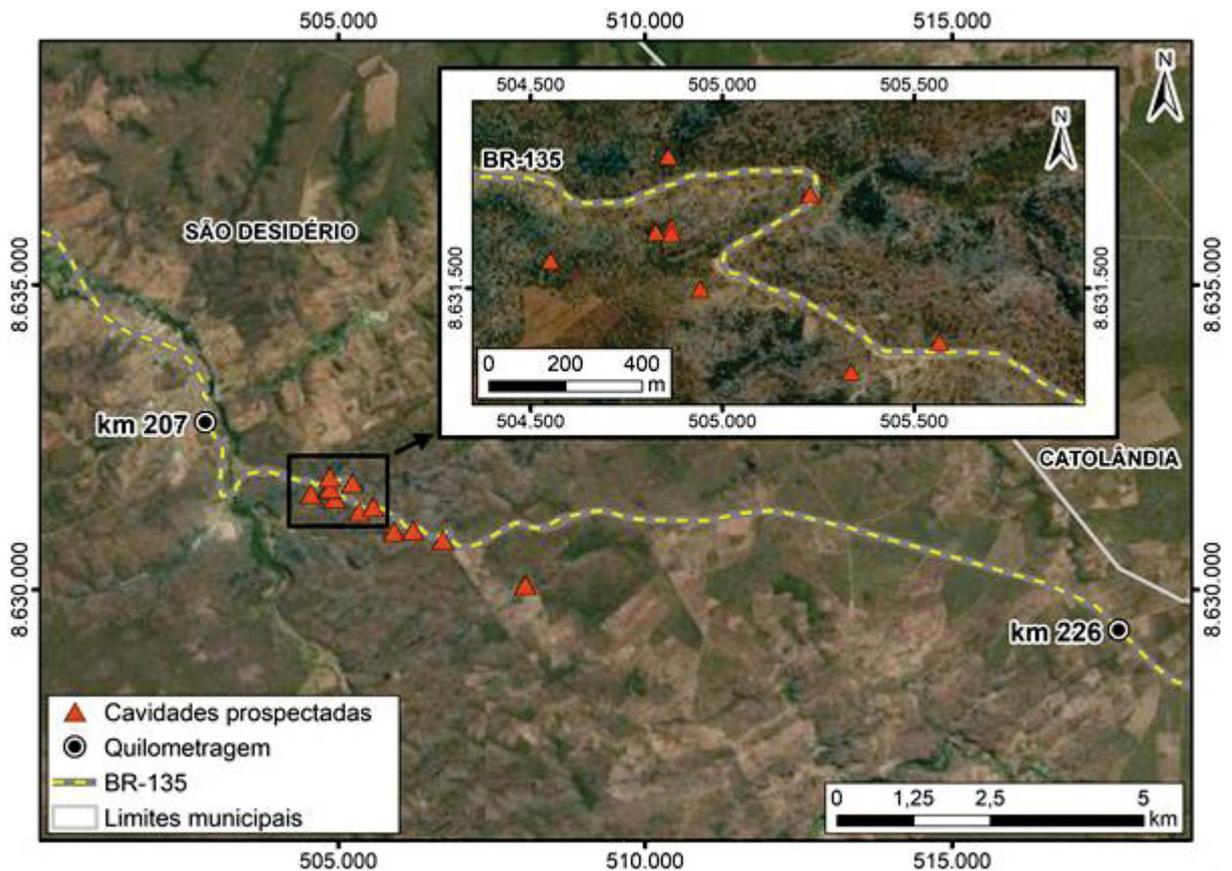
O Cerrado é considerado o “berço das águas” do Brasil, pois abriga três das maiores bacias hidrográficas sul-americanas (Tocantins, São Francisco e Prata), sendo considerado importante para as atividades humanas e favorece a manutenção de uma alta biodiversidade. Nesse sentido, é reconhecido como a savana mais rica do mundo, abrigando 11.627 espécies de plantas nativas já catalogadas, cerca de 200 espécies de mamíferos, 800 de aves, 1.220 de peixes, 180 de répteis e 150 de anfíbios (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2018). Devido a essa alta riqueza, com um expressivo percentual de espécies endêmicas, e à alta perda de habitat pelo avanço da agricultura, o Cerrado é considerado um “hotspot” do mundo, ou seja, uma região prioritária para conservação da diversidade biológica global (MYERS *et al.*, 2000).

O cadastro de cavidades do ICMBio/CECAV (2015), registra um pouco mais de 1200 cavernas no estado da Bahia, até o momento, 200 localizadas no município de São Desidério. A constituição geológica do substrato da BR-135 entre os km 206 e 226, caracteriza a área de estudo como setor de muito alto potencial

espeleológico, pela potencialidade de ocorrência de cavernas, segundo estabelecido pelo ICMBio – CECAV.

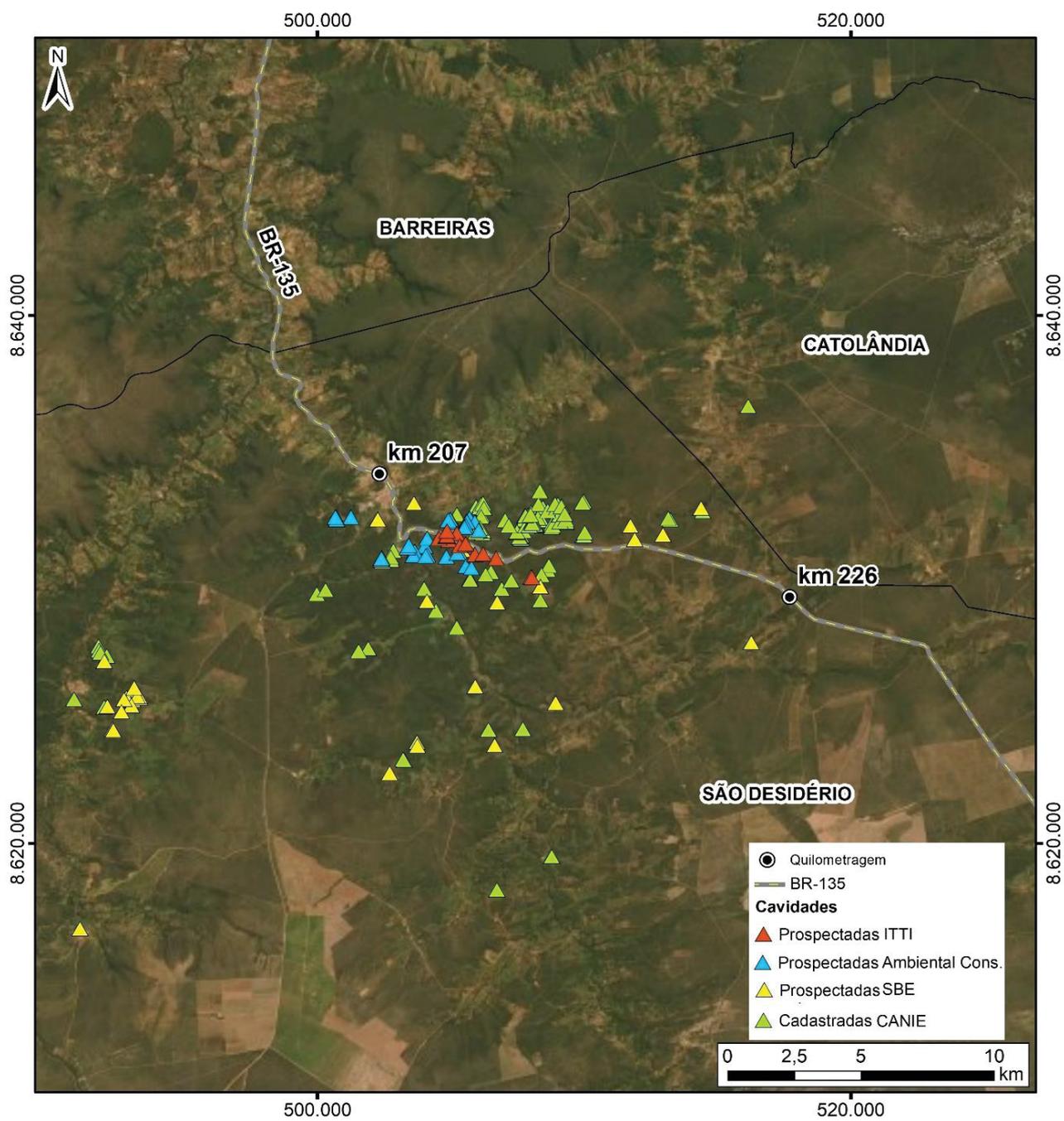
Para a província espeleológica Bambuí (KARNANN; SANCHEZ, 1979), desenvolvida em metacalcários da Fm. São Desidério, tem registro de cavidades prospectadas em campo pela empresa Ambiental Consultoria, pela UFPR/ITTI (FIGURA 5.1), bem como, registros no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV/ICMBio) e o Cadastro Nacional de Cavernas do Brasil (CNC) da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) (FIGURA 5.2).

FIGURA 5.1 - CAVIDADES PROSPECTADAS PELO ITTI/UFPR ENTRE OS KM 207 E 226.



Fonte: ITTI (2014)

FIGURA 5.2 - CAVIDADES CADASTRADAS ENTRE OS KM 207 E 226 DA BR-135/BA



5.1 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO

O Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) foi instituído pela Lei 9.985 de 18 de julho de 2000. No seu Artigo 2º as Unidades de Conservação (UCs) são definidas como espaço territorial e seus recursos ambientais com características naturais relevantes, legalmente instituídas pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção (BRASIL, 2009).

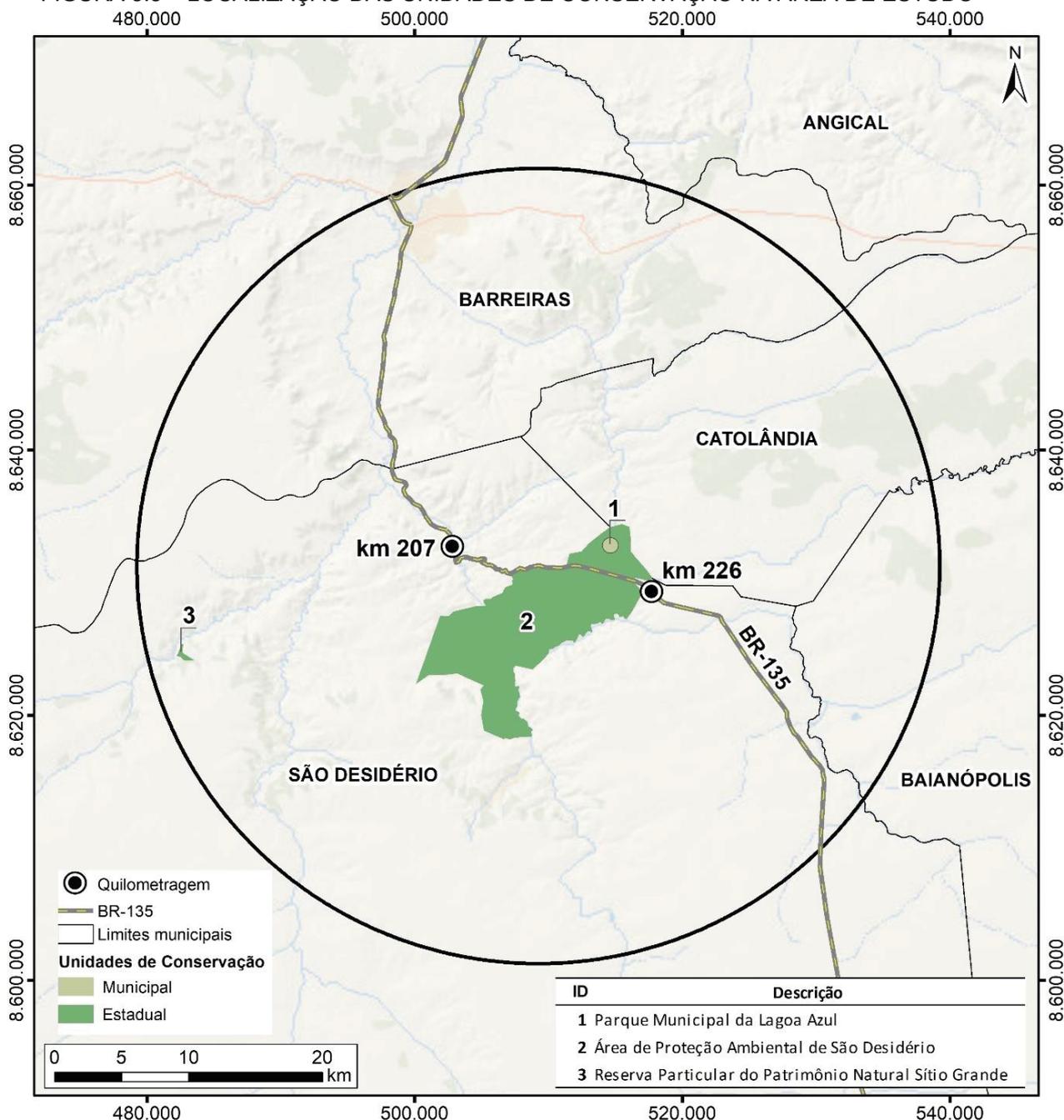
As Unidades de Conservação estão divididas em categorias pelo SNUC em Unidades de Proteção Integral, que inclui as categorias de Estação Ecológica, Reserva Biológica, Parque Nacional, Monumento Natural e Refúgio da Vida Silvestre; e Unidades de Uso Sustentável, que inclui as categorias de Área de Proteção Ambiental, Área de Relevante Interesse Ecológico, Floresta Nacional, Reserva Extrativista, Reserva de Fauna, Reserva de Desenvolvimento Sustentável e Reserva Particular do Patrimônio Nacional.

O Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), criado pela Lei nº 11.516/2007, é o Órgão Ambiental responsável por todos os aspectos relativos às áreas protegidas. É mantido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), com a colaboração dos órgãos gestores federais, estaduais e municipais, que realizam o cadastramento das unidades de conservação sob sua gestão, o Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC) disponibiliza um banco de dados com informações oficiais do SNUC.

Segundo dados do CNUC o Brasil conta com 2376 Unidades de Conservação em seu território, sendo 761 unidades de Proteção Integral e 1615 de Uso Sustentável, cobrindo uma área total de 2.549.329 km². Para o bioma Cerrado são cadastradas 438 Unidades de Conservação, das quais 296 são de Uso Sustentável e 142 de Proteção Integral (CNUC, 2020).

Na área de estudo, entre o km 207 ao 226 da rodovia BR-135, há três unidades de conservação, das quais duas são de uso sustentável (Área de Proteção Ambiental de São Desidério e Reserva Particular do Patrimônio Natural Sítio Grande) e uma de proteção integral (Parque Municipal da Lagoa Azul). (FIGURA 5.3).

FIGURA 5.3 – LOCALIZAÇÃO DAS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO



Fonte: Adaptado de BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (2018), IBGE (2015)

Apenas a APA de São Desidério localiza-se dentro da faixa (*buffer*) de 10 km delimitado para a rodovia. Criada através do Decreto Estadual nº 10.020 de junho de 2006. Abriga um conjunto notável de feições cársticas, têm entre seus objetivos promover o ordenamento e controle do uso do solo, dos recursos hídricos e dos demais recursos ambientais de excepcional valor, como bens públicos, inclusive o patrimônio geológico, espeleológico, arqueológico, paleontológico e cultural da região.

Cabe destacar que o Parque Municipal da Lagoa Azul, em seu decreto de criação (Decreto municipal nº 7 de 11 de janeiro de 2005) apresenta como objetivo da criação da unidade, a preservação do ecossistema carste e hidrocarste da Lagoa Azul e da Gruta do Catão, além de propiciar condições para a realização de pesquisa científica e desenvolvimento de atividades de educação ambiental e de lazer.

A presença das unidades de conservação Parque Municipal da Lagoa Azul e APA de São Desidério, é de fundamental importância para a manutenção da diversidade regional e podem ser priorizadas na aplicação de medidas que as tornem efetivas, no cumprimento de seu objetivo de criação, visando buscar uma área que seja possível conservar as cavidades de grande relevância espeleológica ao redor do empreendimento.

Lobo *et al.* (2013) discutem sobre a proposta em curso para criação de uma Unidade de Conservação de Proteção Integral (Parque Nacional) e outra de Uso Sustentável (Área de Proteção Ambiental), ambas em São Desidério.

Embora o conceito de geoparque não esteja regulamentado pelo amparo legal brasileiro como unidade de conservação, há um movimento coordenado pelo CPRM e Prefeitura Municipal de São Desidério para a criação do geoparque de São Desidério, conforme modelo de propostas adotado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM e respaldado em um inventário de 14 geossítios e sítios da geodiversidade. O geoparque é um modelo de gestão territorial onde se dá ênfase no levantamento, valoração, valorização e divulgação dos elementos da geodiversidade, aliado ao fortalecimento da identidade territorial, objetivando o desenvolvimento sustentado da região, com base no uso do seu patrimônio geológico através do geoturismo, do uso educativo e turístico de locais com interesse geológico.

5.2 ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE

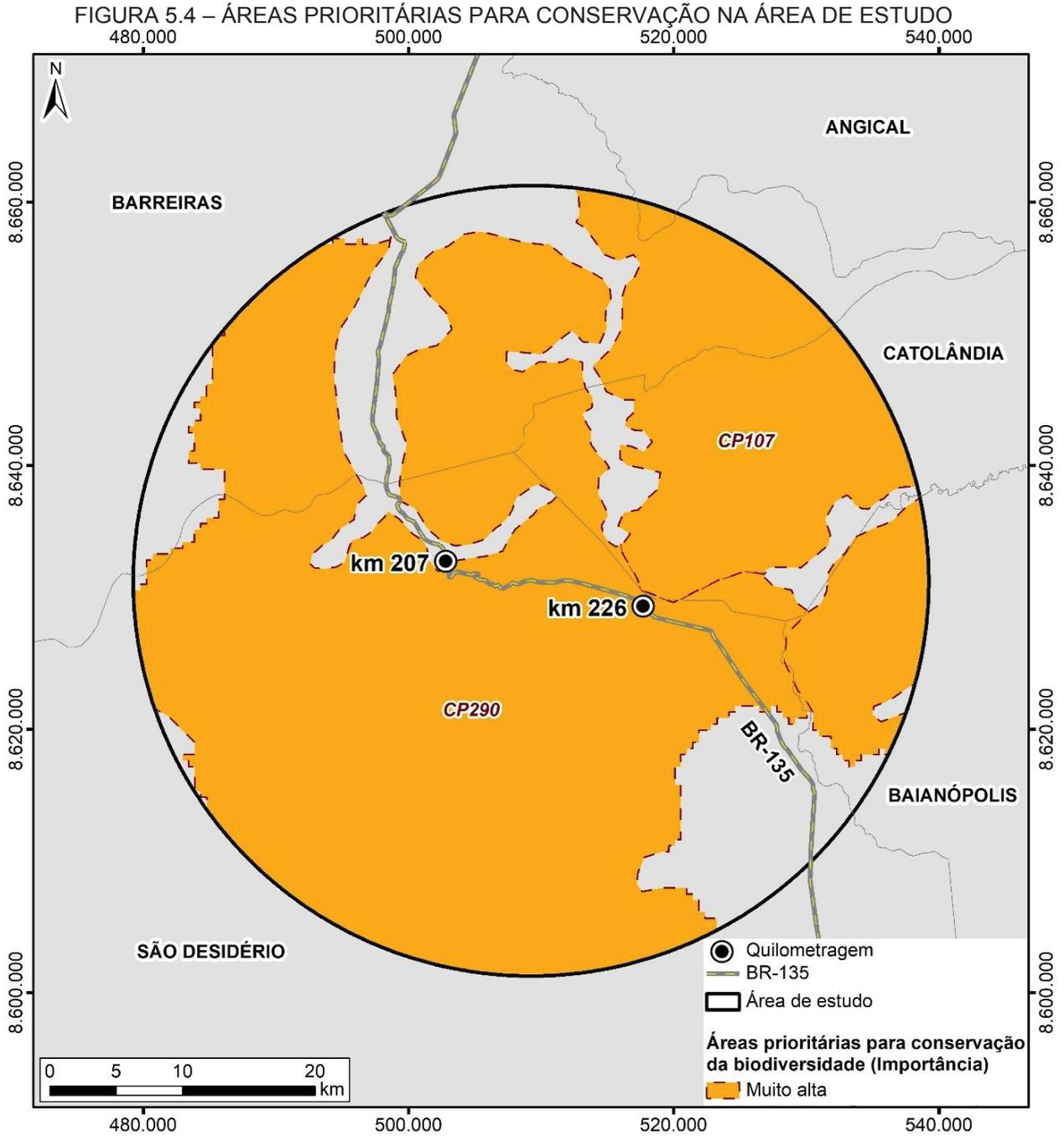
As áreas prioritárias para a conservação são um instrumento de política pública para apoiar a tomada de decisão, de forma objetiva e participativa, cujos resultados vêm sendo utilizados no planejamento e na implementação de ações como criação de Unidades de Conservação, licenciamento, fiscalização e fomento ao uso sustentável.

As regras para a identificação de tais áreas e ações prioritárias foram instituídas formalmente pelo Decreto nº 5092/2004 no âmbito das atribuições do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, /2004). Entre os anos de 1998 e 2000, foi realizada a primeira “Avaliação e Identificação de Áreas e Ações Prioritárias para a Conservação, Uso Sustentável e Repartição dos Benefícios da Biodiversidade dos Biomas Brasileiros”. Foram definidas 900 áreas, conforme estabelecido no Decreto nº 5.092, de 24 de maio de 2004, e instituídas através da Portaria MMA nº 126, de 27 de abril de 2004. A Portaria MMA nº 09, de 23 de janeiro de 2007 atualizou as áreas.

Estas áreas são classificadas de acordo com o grau de relevância para conservação (alta, muito alta ou extremamente alta) e com a importância biológica ou ecológica (alta, muito alta, extremamente alta ou insuficientemente conhecida). A atualização das áreas e ações prioritárias, em função da disponibilidade de novos dados, informações e instrumentos, é uma prioridade para o Ministério do Meio Ambiente, em consonância com as estratégias recomendadas pela Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB), pelo Plano de Ação para Implementação da Política Nacional de Biodiversidade (PAN-Bio) aprovado na 9ª Reunião Extraordinária (Deliberação CONABIO nº 40 de 07/02/06) e pelo Plano Nacional de Áreas Protegidas (PNAP) instituído pelo Decreto nº 5758 de 13/04/2006.

As Áreas Prioritárias para Conservação dos biomas Cerrado, Pantanal e Caatinga foram atualizadas mediante Portaria nº223, de 21 de junho de 2016. Posteriormente, segundo informações disponíveis no endereço eletrônico do Ministério do Meio Ambiente (<http://areasprioritarias.mma.gov.br/2-atualizacao-das-areas-prioritarias>) a nova Portaria nº 463 de 18 de dezembro de 2018, incorporou os resultados da 2ª Atualização do Cerrado, Pantanal e Caatinga, já reconhecidos pela Portaria nº223/2016.

Neste contexto, no trecho entre os quilômetros 207 e 226 da rodovia BR 135/BA foram identificadas duas Áreas Prioritárias para a Conservação codificadas pela Portaria 463/2018 como CP107 e CP 290, as quais foram classificadas como Importância Muito Alta (FIGURA 5.4), que podem ser escolhidas como objeto de futura compensação ambiental e/ou espeleológica.



Fonte: Adaptado de IBGE (2015), BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (2018).

6 PROPOSTAS DE CONSERVAÇÃO DE CAVIDADES NATURAIS EM ÁREAS CÁRSTICAS SOB RISCOS DE IMPACTOS PROVENIENTES DA CONSTRUÇÃO DE ESTRADAS

Não se deve analisar uma região com características cársticas apenas pelos aspectos superficiais do terreno. O endocarste e o exocarste possuem uma relação intrínseca e dinâmica. Os ambientes cársticos denotam maior complexidade à gestão ambiental, posto que algumas das suas feições mais notáveis e importantes, tais como cavernas, redes subterrâneas de drenagem, vazios oclusos e inacessíveis nos maciços rochosos, podem não estar expostos. E apesar de não serem as únicas feições de destaque e de caráter inusitado, são certamente componentes primordiais nas análises de tais ambientes, assim como também as surgências e sumidouros, dolinas, lapiás e paredões com cânions.

Nas últimas décadas os avanços das discussões sobre o patrimônio espeleológico subsidiaram o estabelecimento de instrumentos legais contendo diretrizes para o licenciamento dos locais a serem protegidos ou conservados. Cabe destacar, como legislação específica sobre o tema, a Portaria do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis nº 887/90 (IBAMA, 1990); Decreto Federal nº 99.556/90 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 1990); Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 347/04 (CONAMA, 2004); Decreto Federal nº 6.640/08 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2008) e a Instrução Normativa nº 02/17 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2017).

No entanto, ainda pouco se discutiu, no âmbito do uso e ocupação de áreas cársticas por empreendimentos lineares, como rodovias, potencialmente impactantes ao patrimônio espeleológico. Não existe um protocolo de ações que oriente que estudos, ensaios e monitoramento devem ser realizados para determinar os impactos negativos desta modificação de ambiente, e que, permitam a adoção de medidas preventivas ou atenuantes dos efeitos negativos derivados de sua implantação.

A identificação e caracterização das cavidades em áreas, direta e indiretamente, afetadas pela instalação do empreendimento são etapas iniciais importantes, para posterior a classificação de relevância das cavidades naturais subterrâneas, observando os critérios estabelecidos na Instrução Normativa nº

02/2017 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2017). Tal classificação, que abrange a análise de atributos ecológicos, biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos, devem ser avaliados sob o enfoque regional e local, permitindo determinar quais são de maior relevância para a conservação.

Nesta tese relatam-se ações e procedimentos que podem ser adotados na fase de planejamento dos projetos, para reduzir, em futura etapa construtiva e operacional, impactos às cavernas desenvolvidas em áreas cársticas. Os procedimentos estabelecidos podem ser adotados em forma de medidas de controle, monitoramento e mitigação de impactos ao patrimônio espeleológico e foram aqui divididos em etapas, sendo: medidas para o resguardo do patrimônio espeleológico durante a fase planejamento da rodovia; medidas mitigadoras para o resguardo do patrimônio espeleológico durante a fase de construção da rodovia; e medidas de monitoramento na fase de operação da rodovia. O estudo realizado visou sobretudo proteger o patrimônio espeleológico. As sugestões contidas na tese são complementares aos procedimentos utilizados em obras de construção civil, que possuem normas e leis vigentes.

6.1 MEDIDAS PARA O RESGUARDO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO DURANTE A FASE PLANEJAMENTO DA RODOVIA

A etapa relativa aos estudos básicos está condicionada à conclusão da fase que determina o traçado preliminar da rodovia e deve ser elaborado levando em consideração as medidas de controle ambiental. Estes estudos caracterizam o local do empreendimento e subsidiam os projetos a serem desenvolvidos, compostos por estudos geológicos, geotécnicos, hidrológicos, hidrogeológicos, topográficos e de tráfego, como estabelecido em normas e leis vigentes. As atividades que compõem um projeto rodoviário já são regulamentadas pelo Manual de Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários – Escopos Básicos e Instruções de Serviço (DNIT, 2006) e pode ser observado no QUADRO 6.1.

QUADRO 6.1 - MEDIDAS DE RESGUARDO AO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO NA FASE DE PLANEJAMENTO DE OBRAS

Estudos	Descrição	Normativas DNIT
Estudos Geológicos	Coleta e pesquisa de dados, interpretação de fotografias aéreas e investigação em campo contendo plano de sondagens, mapeamento geológico, descrição geológica da região e recomendações	IS-202
Estudos Geotécnicos	São estudos de subleito e o estudo de empréstimos e ocorrências de materiais. O estudo do subleito é realizado ao longo do eixo do traçado selecionado e é baseado no projeto geométrico básico. Também se realiza estudo de estabilidade de taludes, estudo de empréstimo para corpo de aterro, estudo de ocorrência de materiais para pavimentação, estudo de fundação dos aterros, estudo dos locais das fundações das obras de arte especiais e estudo de estabilidade dos taludes	IS-206, DNER PRO 381/98, DNER-PRO 257/99
Estudos Hidrológicos	Incluem coleta de dados hidrológicos e definição das bacias de contribuição, com levantamentos topo-hidrológicos nas travessias dos principais cursos d'água, que possibilitem a elaboração de plantas compatíveis para o projeto de implantação de pontes ou bueiros celulares de grandes dimensões.	IS-203
Estudos Topográficos	Necessários para definição das alternativas de traçado. Engloba locação do eixo no projeto, nivelamento do eixo, levantamento das seções transversais, levantamento de ocorrências de materiais, levantamentos para áreas específicas e levantamento cadastral da faixa de domínio.	ABNT-NBR 13133/94, IS-204
Estudo de Tráfego	Estima o volume de tráfego e subsidia os projetos da superestrutura, fornecendo subsídios ao dimensionamento do pavimento. Objetiva avaliar a suficiência do sistema de transportes existentes, servir de subsídio para definição do traçado e padrão da rodovia, definição de classe da rodovia a ser implantada, dimensionamento das características técnicas, determinação das características operacionais da rodovia e fomento de insumos para análise de viabilidade econômica.	Manual de Estudos de Tráfego DNIT IPR-723

Fonte: DNIT (2006).

No que se refere a projeto, são realizados estudos preliminares de engenharia em duas fases, sendo elas preliminar e definitiva. A preliminar corresponde à coleta, compilação e análise de dados e elementos disponíveis, assim como o estudo das alternativas de traçado e uma estimativa sucinta dos custos de implantação. Enquanto a fase definitiva, é voltada para a análise e

avaliação das alternativas e a definição de suas concepções geométricas. Os estudos abordam as seguintes atividades: definição das diretrizes tecnicamente possíveis da rodovia, determinação da viabilidade física das alternativas indicadas como sendo adequadas pelos estudos de tráfego, definição de soluções básicas para a elaboração desembaraçadas dos trabalhos mais detalhados nos estudos posteriores, estimativa dos custos de construção e desapropriação para a avaliação econômica e financeira.

A etapa relativa ao projeto de infraestrutura engloba o projeto geométrico, de terraplenagem, drenagem e obras de arte corrente (OAC), com procedimentos metodológicos detalhados nas Diretrizes Básicas para elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários do DNIT (2006) e no Manual de Implantação Básica do DNIT (2010). O projeto geométrico é realizado ao longo das etapas de projeto básico e executivo. A fase de projeto básico é elaborada a partir dos estudos topográficos e de tráfego existentes, definindo quadro de características técnicas e operacionais, projeto em planta, projeto em perfil, seções transversais típicas da plataforma. A fase de projeto executivo constará de projeto planialtimétrico, determinação das seções transversais do projeto e detalhamento dos elementos especiais, observado no QUADRO 6.2.

QUADRO 6.2 – ETAPAS RELATIVAS AOS PROJETOS RODOVIÁRIOS DE ACORDO COM AS DIRETRIZES BÁSICAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS RODOVIÁRIOS (2006).

Projeto	Descrição	Normativas
Projeto de terraplenagem	Desenvolvido em duas fases de projeto, englobando a determinação dos volumes de terraplenagem, determinação dos locais de empréstimos e bota-fora e apresentação de quadros de distribuição e orientação do movimento de terra.	IS-209
Projeto de drenagem	Se destina à escolha da melhor solução para o escoamento de águas superficiais e transposição de corpos hídricos, bem como manutenção dos níveis subterrâneos por drenagem subsuperficial. O projeto de drenagem é definido por meio de alguns pontos bases, como: estimativa de custos, número, localização provável, entre outros. São condicionantes do projeto os estudos hidrológicos, projetos geométricos, de terraplenagem e de pavimentação e estudos geotécnicos.	IS-210
Projeto de pavimentação	É realizado por fases de Projeto Básico e a de Projeto Executivo, contemplando a concepção do projeto de pavimentação, seleção	IS-211

Projeto	Descrição	Normativas
	das ocorrências de materiais a serem indicadas no projeto, dimensionamento e concepção do projeto por subtrecho homogêneo, cálculo dos volumes e distâncias de transporte dos materiais empregados.	
Projeto de Interseções, retornos e acessos	Tem por objetivo definir e especificar os serviços constantes do projeto de interseções, retornos e acessos. Seu desenvolvimento é também separado nas etapas de projeto básico e fase de projeto executivo. No projeto básico é justificada a solução adotada, desenvolvido o projeto gráfico planialtimétrico e as seções transversais típicas. Na fase de projeto executivo é realizado o detalhamento da concepção do projeto.	IS-213
Projeto de sinalização	Deverá seguir as recomendações do Manual de Sinalização Rodoviária do DNIT e o Manual de Sinalização de Trânsito – DENATRAN, englobando projeto de sinalização horizontal das vias, projeto de sinalização vertical das vias, projeto de sinalização dinâmica por semáforos e painéis de mensagens variáveis.	IS-215, DNER-ME 368, DNER-ME 371, DNER-ME 372 e DNER-ME 373
Projeto de Obras Complementares	Tem por objetivo definir e especificar serviços constantes não englobados na infra ou superestrutura do projeto. É realizado em duas fases, sendo o Projeto Básico e o Projeto Executivo. Na fase de projeto básico, deverá constar a definição dos dispositivos de segurança, as estimativas das quantidades de serviços e os custos estimados. Enquanto na fase de projeto executivo, deverá ser realizado o detalhamento das soluções propostas no projeto básico, assim como, a execução das notas de serviço e a montagem do orçamento e Projeto de Execução da Obra.	IS-217 e de acordo com as normas ABNT e DNER
Projeto de Cercas	Tem como objetivo a definição dos tipos de cerca a serem empregados e estimativa das quantidades e custos, com detalhamento das soluções propostas, elaboração de notas de serviço e montagem de orçamentos e projeto de execução de obra.	IS-218, DNER-ES 338, DNER-EM 366, DNER-EM 033 e DNER-EM 174

Fonte: DNIT (2006).

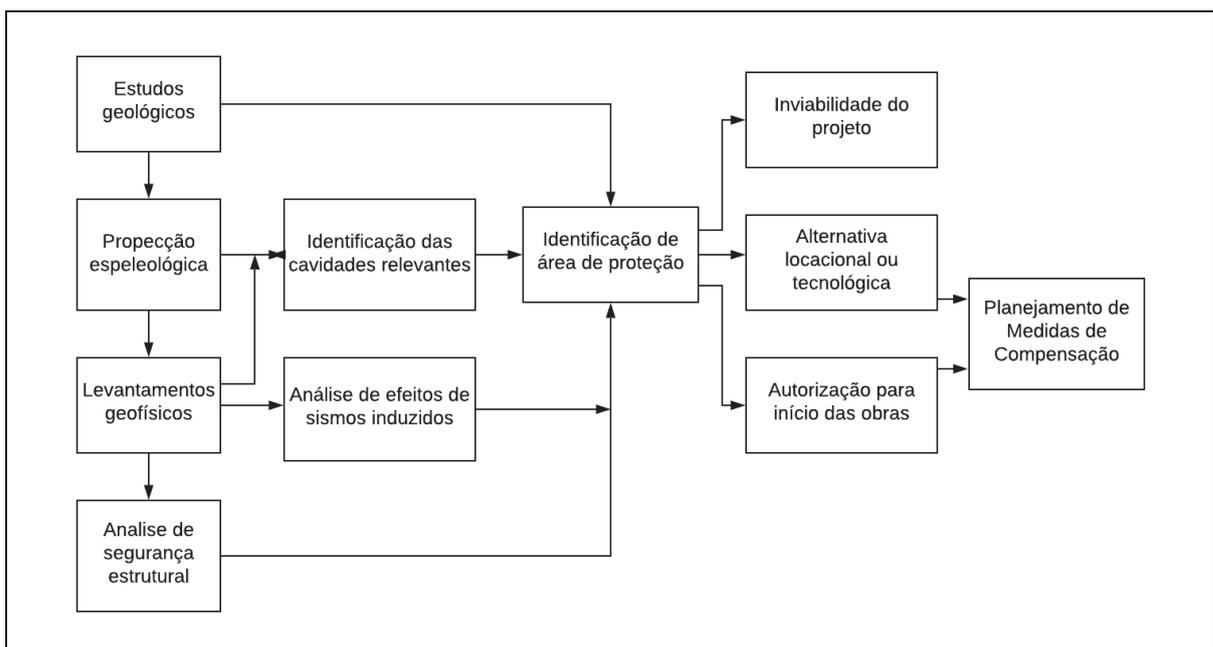
Antes da construção de estradas em regiões com potencial de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas, recomenda-se nesta tese a realização de estudos que permitam compreender o contexto geológico e geomorfológico da área, direta e

indiretamente afetadas pela construção de rodovias ou empreendimentos lineares semelhantes (FIGURA 6.1 e QUADRO 6.3).

Algumas cavidades não possuem entradas acessíveis no raio de 250 m de distância do empreendimento estipulado pela legislação, o que pode criar uma falsa impressão de que a área afetada pelo empreendimento não possui cavidades naturais vulneráveis. O uso de métodos geofísicos, não destrutíveis, possibilitam em curto espaço de tempo, identificar a posição de cavidades, em relação ao projeto planejado. Sendo então, possível avançar para a etapa de determinação do grau de relevância de cada cavidade, permitindo avaliar quais cavernas devem ser conservadas como patrimônio espeleológico local ou regional.

Conhecendo a posição das cavernas e as características das rochas em que se desenvolveram, é possível, com uso de métodos geotécnicos, uso de modelagens e cálculos preliminares avaliar fator de segurança ante o risco de colapso da estrutura das cavidades em função do acréscimo de tensões geradas na construção e operação de estradas. Este conjunto de métodos permitirá a tomada de decisões durante o processo de avaliação dos órgãos responsáveis pela liberação das obras, quanto à viabilidade da instalação da rodovia em determinada localização.

FIGURA 6.1 - MEDIDAS DE RESGUARDO AO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO NA FASE DE PLANEJAMENTO DE OBRAS



Fonte: O autor (2020).

QUADRO 6.3 - MEDIDAS DE RESGUARDO AO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO NA FASE DE PLANEJAMENTO DE OBRAS

Medidas preventivas de proteção	Justificativas	Métodos e materiais utilizados
Estudos geológicos	<p>Caracterização do contexto geológico da área do empreendimento.</p> <p>Identificação e cartografia de cavidades naturais na área indireta e diretamente afetadas pela obra.</p> <p>Caracterização de estruturas tectônicas que possam facilitar movimentos e despregamento de material.</p> <p>Determinação do potencial espeleológico.</p>	<p>Elaboração de mapas geológicos regional e de detalhe, com o traçado do anteprojeto. Uso de bases cartográficas e mapas geológicos atualizados, imagens de sensoriamento remoto, VANT e/ou de satélites, com verificação de campo.</p> <p>Entrevistas com moradores locais, pesquisa de informações disponíveis na <i>Sociedade Brasileira de Espeleologia</i> – SBE e no <i>Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas</i> – CECAV/ICMBio.</p> <p>Análise de fraturas, falhas e deformações tectônicas, sistemas de estruturas e lineamentos regionais, para confecção de diagramas de atitudes e frequência das estruturas e modelagem.</p>
Prospecção espeleológica	<p>Determinação do potencial espeleológico.</p> <p>Identificação e caracterização do patrimônio espeleológico da área de influência do empreendimento.</p>	<p>Elaboração de mapa de potencial espeleológico, com informações de bases cartográficas, imagens de sensores remotos, mapas geológicos, entrevistas com moradores locais e informações disponíveis no <i>Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas</i> – CECAV/ICMBio e <i>Sociedade Brasileira de Espeleologia</i>.</p> <p>Levantamento por caminhamento prospectivo em faixa (<i>buffer</i>) de 250 m de distância, para cada lado do eixo da rodovia projetada. Em zonas de maior potencial espeleológico, utilizar linhas com equidistância máxima de 100 m.</p>
Levantamentos geofísicos	<p>Caracterização de contexto físico das cavidades, por métodos geofísicos.</p> <p>Identificação de possíveis cavidades de subsuperfície, variações litológicas e feições estruturais.</p> <p>Caracterização de campo das cavidades.</p>	<p>Levantamentos geofísicos para melhor definição das feições e estruturas do substrato, tais como, vazios subterrâneos, suas conexões e controle por estruturas tectônicas. De preferência com métodos investigativos geofísicos indiretos, não destrutivos.</p> <p>Elaboração de mapa com localização, delimitação, e volume mais precisos, assim como eventuais comunicações das cavidades, em relação ao eixo da rodovia projetada.</p> <p>Levantamento topográfico das cavidades e descrição de aspectos físicos e bióticos, de campo.</p>
Identificação de cavidades relevantes	<p>Determinação do grau de relevância das cavidades identificadas.</p>	<p>Determinação do grau de relevância das cavidades localizadas a 250 m de distância da área diretamente afetada pelo empreendimento, conforme atributos sugeridos na</p>

Medidas preventivas de proteção	Justificativas	Métodos e materiais utilizados
	Determinar as cavidades mais relevantes a conservar.	IN nº 02/2017 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente).
Análise preliminar de segurança estrutural	Estudos geotécnicos para estimar riscos à segurança da estrutura das cavidades.	Identificação das cavidades que devem ser priorizadas nas ações de proteção, mediante avaliação do grau de relevância.
Análise de efeitos de vibrações induzidas	Análise de efeitos de vibrações geradas na construção e operação de via, por sismos induzidos em simulações de uso.	Tem por objetivo avaliar a susceptibilidade de ruptura das rochas, mediante análises geotécnicas, incluindo simulações de instalação e operação da rodovia, que permitam calcular a distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas ao maciço rochoso. Análise estrutural, determinação de sistemas de tensões, anisotropias litológicas, estado de alteração do meio e regime hidrogeológico. Os resultados devem permitir indicar distância recomendável de proteção estrutural da cavidade. A realização de sondagens permite certificar os resultados geofísicos e calibrar os parâmetros geotécnicos.
Identificação de áreas de proteção	Segurança das cavidades, mediante estabelecimento de áreas de proteção estrutural.	Instalação de sismógrafos, ao lado da rodovia e no interior das cavidades, para analisar a velocidade de propagação e alcance de sismos induzidos por equipamentos durante a fase de construção da rodovia. Comparar com os valores estabelecidos pelo CECAV (2018), de 3 mm/s, para proteção das cavidades.
Planejamento de medidas de compensação espeleológica	Estabelecimento de áreas prioritárias para conservação, como forma de compensar danos inevitáveis ao patrimônio local.	Análise integrada dos resultados das caracterizações geológica, geofísica e geotécnica, para estabelecer-se uma área de segurança estrutural de cada cavidade que pode ser impactada pela obra.
	Proposição de medidas de compensação espeleológica	Identificação de áreas prioritárias para conservação do patrimônio natural, conforme disposto no Decreto nº 5092/2004 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente) e Decreto nº 5758/2006 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente). Estudo e proposição de medidas de compensação espeleológica, conforme Decreto nº 99.556/1990, alterado pelo Decreto nº 6.640/2008, regulamentado pela IN ICMBIO nº 01/2017 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente) com alterações posteriores.

Fonte: O autor (2020).

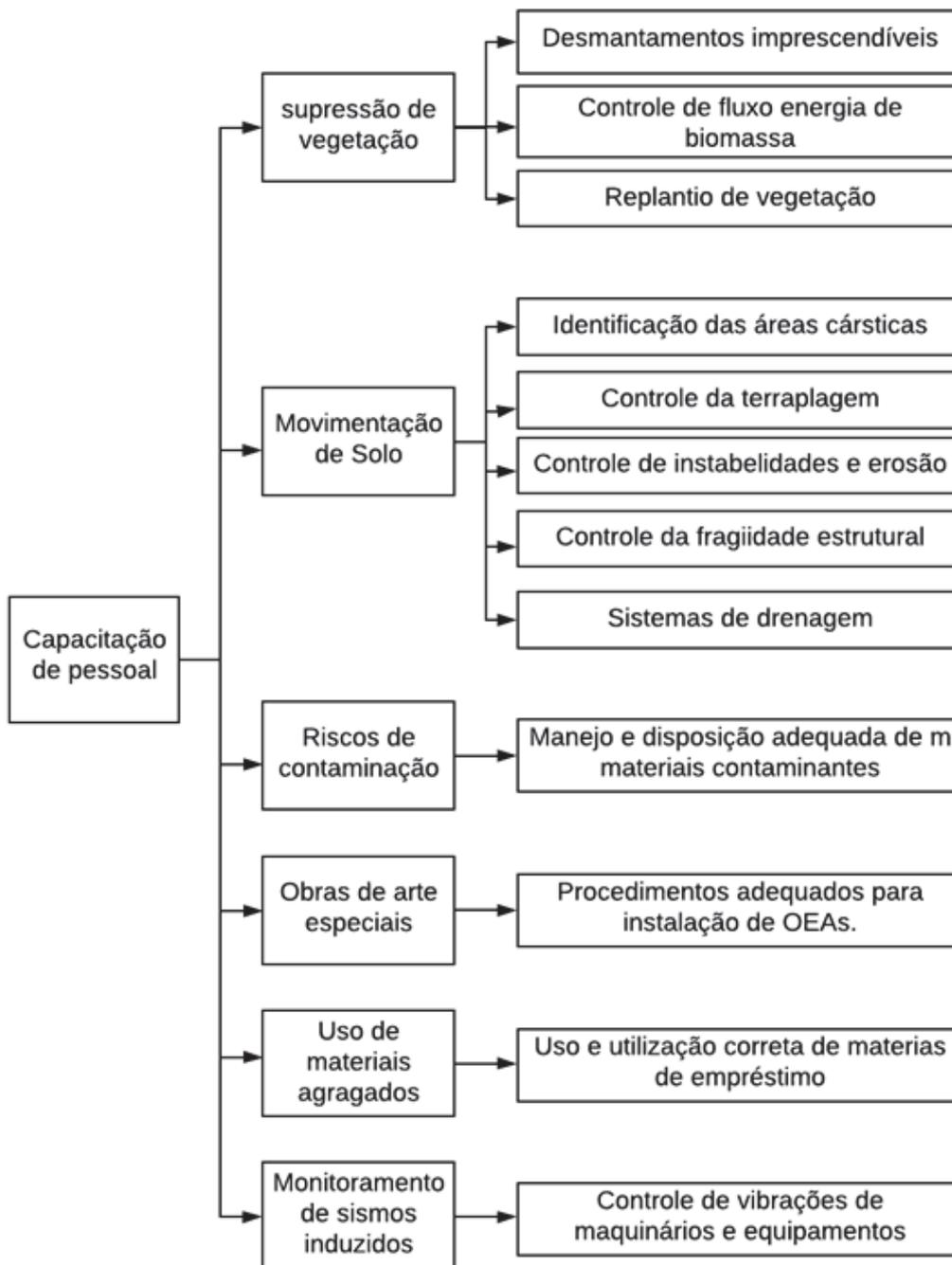
A etapa de orçamento é a fase final do projeto, sendo dependente das demais. A elaboração do orçamento conta com a pesquisa de mercado, cálculo dos custos unitários dos serviços, estudo dos custos de transporte, orçamento das alternativas que fornecerá elementos para análise econômica e determinações dos custos dos principais itens de serviço, seguido de listagem definitiva dos serviços a executar e dos materiais e respectivas distâncias de transporte, seguindo a metodologia do Manual de Composição de Custos Rodoviários do DNIT. Os custos relativos aos componentes ambientais devem considerar a recuperação de áreas degradadas, plantios compensatórios, compensações ambientais em decorrência do licenciamento ambiental previsto na Lei nº 9.985/2000, regulamentada pelo Decreto nº 4.340/2002 e a compensação espeleológica conforme determinado pelo Decreto nº 99.556/1990, alterado pelo Decreto nº 6.640/2008 e regulamentado pela Instrução Normativa ICMBIO nº 01/20172 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente) com alterações supervenientes.

6.2 MEDIDAS MITIGADORAS PARA O RESGUARDO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO DURANTE A FASE DE CONSTRUÇÃO DE RODOVIA

Com o objetivo de resguardar a integridade e as condições de conservação do patrimônio espeleológico, após autorização para início da construção de estradas devem ser tomadas medidas para proteção das cavidades naturais. As atividades potencialmente impactantes relacionadas à supressão de vegetação, movimentação de solos, manuseio de produtos perigosos, instalação de obras de arte especiais, uso de materiais de empréstimos e monitoramento de sismos induzidos, precisam ser monitoradas durante toda a fase de obras. Os resultados destes monitoramentos devem ser utilizados para controle, permitindo a correção de possíveis riscos às cavidades durante o processo construtivo.

Neste contexto, são apresentadas medidas mitigadoras de impactos mais frequentes nas obras de instalação, e que devem ser adotadas para resguardar o patrimônio espeleológico (FIGURA 6.2 e QUADRO 6.4).

FIGURA 6.2 - MEDIDAS MITIGADORAS PARA O RESGUARDO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO DURANTE A FASE DE CONSTRUÇÃO DE RODOVIA.



Fonte: O autor (2020)

QUADRO 6.4 - MEDIDAS MITIGADORAS PARA O RESGUARDO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO DURANTE A FASE DE CONSTRUÇÃO DE RODOVIA.

Medidas preventivas de proteção	Justificativas	Métodos e materiais utilizados
Capacitação de pessoal	Treinamento de todos os funcionários envolvidos na obra.	Independente de função exercida, todos os funcionários devem receber treinamento e qualificação, visando prepará-los sobre os diversos aspectos relacionados à fragilidade do sistema cárstico, importância e conservação das cavidades.
Supressão de vegetação	Severo controle de desmatamentos imprescindíveis. Conservação do fluxo de energia proveniente da biomassa de origem externa.	As áreas onde a supressão de vegetação for necessária devem ser sinalizadas e demarcadas, restringindo a ação à área diretamente afetada para implantação da rodovia. Devem ser conservados os remanescentes florestais em regiões de presença de cavidades, mesmo que as áreas não sejam interceptadas pela passagem da rodovia. Elaborar mapas da vegetação da Área de Estudo, utilizando-se da interpretação de imagens de satélite ou fotografias aéreas (recentes) e estudos eventualmente existentes, de forma a classificar as formações nativas quanto ao estágio de sucessão, domínios e fitofisionomias existentes, integrando-os aos itens de uso e ocupação do solo.
	Recuperação das áreas de vegetação suprimida.	Apresentação de um plano de recuperação de área degradada a ser aprovado pelo órgão ambiental. Os solos orgânicos oriundos da operação de limpeza do terreno deverão ser removidos e estocados para posterior utilização na recuperação ambiental das áreas degradadas pelas obras. Deverão ser utilizados métodos de contenção para evitar o carreamento de material pelas águas pluviais ou fluviais. A recomposição e cobertura das áreas degradadas deverão ser realizadas com espécies nativas típicas da fitofisionomia regional, promotoras de sucessão ecológica. Devem-se evitar espécies exóticas agressivas.

Medidas preventivas de proteção	Justificativas	Métodos e materiais utilizados
Movimentação de solo	Identificação e conservação de áreas cársticas e lideiras à rodovia.	No perímetro de proteção devem ser instalados cercamentos provisórios, com fitas zebradas, placas sinalizadoras, cavaletes refletores e luminescentes (caso haja serviços de obra noturnos), em período anterior ao início das obras, restringindo o trânsito de pessoas e máquinas exclusivamente à faixa de domínio.
	Terraplanagem e modificações necessárias do terreno.	Cuidados especiais devem ser tomados para evitar o carreamento de material superficial inconsolidado para o interior das cavidades, que causam assoreamento ou até preenchimento total. Recomenda-se instalação de barreiras mecânicas e cuidados com a drenagem das águas pluviais.
	Instabilidade de depósitos e erosão.	Identificação e mapeamento das áreas de maior fragilidade estrutural e maior potencial de escorregamento de solos superficiais permitirá a prevenção de impactos decorrentes da movimentação dos solos por gravidade.
	Fragilidade decorrente de fraturamento e/ou alteração intempérica das rochas e/ou coesão natural.	Identificação e cartografia de zonas e locais afetados por fraturamento associado a lineamentos geológicos, alteração intempérica e/ou baixo grau de litificação das rochas, que frequentemente controlam o desenvolvimento de cavidades. E são responsáveis por sua maior fragilidade estrutural. Devem ter maior frequência de fiscalização, com eventual substituição de equipamentos pesados ou alteração de planos de fogo (com cargas menores).
	Modificações necessárias em sistemas de drenagem.	Planejados a não conduzir os fluxos das águas e materiais particulados (sedimentos) para o interior de cavidades naturais subterrâneas, evitando o risco de assoreamento. Os locais de lançamento devem contar com dissipadores de energia das águas.

Medidas preventivas de proteção	Justificativas	Métodos e materiais utilizados
Riscos de contaminação	Contaminação por materiais perigosos.	<p>Controle na disposição de resíduos, no manuseio de óleos, graxas e combustíveis e demais materiais tóxicos. Os danos de mau uso e manipulação destas substâncias ou acidentes são imediatos, ou até irreversíveis, aos aquíferos limitrofes ao empreendimento. Ao atingirem sistemas cársticos, a dimensão dos acidentes se amplia e acelera, tornando impossível sua contenção, constituindo um sério risco ao ecossistema cavernícola.</p> <p>Devem-se realizar campanhas trimestrais de amostragem de águas superficiais diretamente afetadas pela construção da rodovia, e das águas subterrâneas. As coletas devem ocorrer até o final das obras, obedecendo os limites estabelecidos em CONAMA 357/2005 (BRASIL. Ministério do Meio Ambiente) e 396/2008 (MMA).</p>
Obras de arte especiais (pontes, túneis, passarelas, viadutos)	Necessidade de instalação de OEA.	Projetos construtivos, operações e uso de materiais de menor interferência possível nas cavidades naturais subterrâneas.
Uso de materiais agregados para construção do rodovia	Áreas de empréstimo de materiais para a obra.	<p>Controle sobre origem de materiais agregados para construção adquiridos, com atenção àqueles oriundos de áreas cársticas, para garantir que tenham proveniência de fornecedores licenciados.</p> <p>Não devem ser utilizadas áreas de empréstimo ou de aquisição de material localizadas em região de ocorrência de cavernas. Se verificada a necessidade de seu estabelecimento em regiões com potencial espeleológico, estas áreas deverão ser prospectadas previamente a seu uso, para verificação da existência de cavernas.</p>
Monitoramento de sismos induzidos	Vibrações derivadas da operação de maquinário utilizado na construção.	<p>Monitoramento da geração de vibrações provenientes de equipamentos pesados, assim como do trânsito dos veículos, que podem causar danos ao patrimônio espeleológico.</p> <p>Adotar uma padronização no plano de monitoramento. A definição da posição dos sensores de vibração em campo deve considerar as áreas de interesse de ocorrência das cavernas e as estruturas geológicas e litotipos condicionantes das cavidades.</p>

Medidas preventivas de proteção	Justificativas	Métodos e materiais utilizados
		<p>Uma campanha de monitoramento antes do início das obras, denominada de <i>Marco Zero</i>, servirá de referência para comparação dos valores no monitoramento da vibração (frequência e a velocidade de propagação de ondas) durante a instalação da rodovia em regiões cársticas. E, especificamente, nas cavernas da área do empreendimento.</p> <p>Para comparação, deve ser monitorada área cárstica lideira e com as mesmas características, sem influência direta da obra. Estas áreas devem ser selecionadas com o objetivo de subsidiar a compreensão do comportamento da vibração gerada pela instalação e operação da rodovia.</p> <p>Adotar padronização na operação de desmontes e qualidade de acessórios utilizados nos planos de fogo. Apresentar em conjunto com o monitoramento sísmográfico as informações quanto a configuração do respectivo desmonte.</p> <p>Não podendo ser completamente eliminadas, as vibrações devem ser consideradas como impacto mitigável, devendo o empreendimento trabalhar estritamente dentro dos intervalos de segurança estrutural nas regiões cársticas existentes, estabelecidos na etapa de planejamento.</p> <p>Obedecendo a um mapa de fragilidade considerando as cavidades e suas áreas de influência, devem ser observados os locais críticos à passagem de equipamentos mais pesados, próximo a cavidades naturais subterrâneas. Se observadas vibrações próximas aos intervalos críticos para cavernas, devido à grande facilidade de adaptação dos veículos, podem ser tomadas as precauções necessárias, como controle de velocidade de tráfego e alteração de maquinário e equipamentos.</p>

Fonte: O autor (2020).

6.3 MEDIDAS DE MONITORAMENTO NAS FASES DE PRÉ-OPERAÇÃO E OPERAÇÃO ASSISTIDA

As fases de pré-operação e operação assistida devem ser iniciadas logo após o término da construção da rodovia, com duração mínima de 24 meses, podendo ser adequada às necessidades do monitoramento de vibração e o entendimento das tendências geotécnicas do maciço rochoso onde se situa a cavidade está inserida, observando o apresentado no QUADRO 6.5.

Observa-se que as indicações de monitoramento que seguem na proposta formulada na tese são complementares aos processos de investigação e monitoramento que as obras civis requerem e são estabelecidas através de normas e leis próprias.

QUADRO 6.5 – MEDIDAS DE MONITORAMENTO NAS FASES DE PRÉ-OPERAÇÃO E OPERAÇÃO ASSISTIDA.

Medidas preventivas de proteção	Justificativas	Métodos e materiais utilizados
Pré-operação	Redução máxima de impacto durante a construção da rodovia.	Análise de vibrações em superfície e no interior da(s) caverna(s). Todos os instrumentos de monitoramento de sismos induzidos devem manter-se ou serem reinstalados na mesma configuração da fase de <i>Marco Zero</i> . Estabelece-se assim uma rede de coleta de dados que cobrirá o trecho definido para os testes da rodovia. Todos os dados coletados no monitoramento até esta fase devem constar em relatórios mensais, com análise das informações obtidas, eventuais danos gerados e medidas mitigadoras implantadas.
Monitoramento posterior	Manter operação assistida.	Monitoramento permanente para, quando observada qualquer registro de vibração anormal, e que possa impactar as cavidades, se implementem adequações de operação da rodovia nos trechos críticos, de modo a garantir sua atividade dentro dos intervalos de segurança. Recomenda-se monitoramentos semestrais nos dois primeiros anos, para análise das tendências de risco geotécnico. Medidas preventivas como sistemas de controle de velocidade e sinalização passiva aos usuários da rodovia reduzem a frequência de acidentes de maior gravidade.

Fonte: Autor (2020).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Impactos em cavernas podem ser de variadas magnitudes e conseqüências, abrangendo desde a sua destruição total (supressão) até impactos localizados de baixa magnitude. A degradação total ou parcial da caverna também pode ocorrer, principalmente na implementação de grandes obras de engenharia como rodovias.

Inúmeros conflitos têm acontecido nesta relação entre a ocupação territorial e a conservação do patrimônio espeleológico. Em muitas dessas situações, na fase de estudos de viabilidade da obra, torna-se necessário proceder a avaliação, que pode vir a ser determinante, tanto para o destino final da caverna quanto para o futuro do empreendimento. Obras que necessariamente venham a causar impactos de grande magnitude ao acervo espeleológico devem ser alteradas ou mesmo inviabilizadas.

O emprego conjunto de técnicas de investigações geofísicas possibilitou melhor definição da posição e dimensões das cavidades da área investigada nesta pesquisa, um estudo de caso. Os resultados obtidos na caracterização da caverna e seu contexto físico não seriam possíveis utilizando-se apenas, por exemplo, o método de caminhamento de prospecção convencional. Nele se utiliza o caminhamento e busca ativa de aberturas correspondentes de entradas de cavidades em raio de 250 metros de distância do empreendimento. A interpretação dos resultados geofísicos obtidos permitiu estimar a posição do patrimônio espeleológico, suas características geométricas, dimensões, profundidades, espessura dos estratos sedimentares, discontinuidades e identificação de contatos geológicos ou outras discontinuidades, dentre outras características para orientar a elaboração de projetos rodoviários.

Neste estudo de caso, as alterações dos Coeficientes de Poisson e Módulo de Elasticidade apresentaram resultados com maior variação de comportamento das tensões, deformações e deslocamentos mais próximos à superfície (arenitos próximos à superfície). Ao redor da cavidade as variações dos resultados, nos metacalcários, foram menores.

A pesquisa indicou que existem recursos técnicos que incluem estudos geotécnicos sistemáticos que permitem avaliar o risco de impacto na construção de estradas calculando-se a distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas ao maciço rochoso, determinando o limite de segurança estrutural para

manter a integridade da cavidade. O modelo utilizado, tratando o maciço apenas como elástico-linearmente uniforme e homogêneo possibilitou uma análise preliminar da situação. Para maior precisão dos resultados de modelagem no comportamento da cavidade e seu entorno, assim como os riscos de impactos e modificações, é necessário considerar análises sistemáticas adicionais que compreendam os fatores que interferem na estabilidade da cavidade, tais como: os sistemas de esforços, posição e frequência das descontinuidades, existência de preenchimentos, percolação de água, deformações plásticas em maciço fraturado, determinação precisa de tipos litológicos, sua distribuição e anisotropias.

Embora existam normas e procedimentos próprios para elaboração de projetos executivos para construção de estradas no que se refere a estudos, projetos e execução, observa-se à ausência de norma nacional relativa à potencialidade de danos em estruturas associados construção de estradas em áreas que possuem estruturas cavernícolas. Buscou-se neste estudo propor um roteiro de métodos investigativos conjugados, para um diagnóstico mais seguro na fase preliminar, para caracterização e viabilidade do prosseguimento de estudos sistemáticos ao redor e no interior de cavidades detectadas, contribuindo desta forma para a geoconservação destes ambientes sensíveis, possibilitando criar ferramentas de subsidio as normas existentes.

Espera-se que este trabalho contribua para o estabelecimento de estratégias de modo a garantir uma gestão sustentável dos recursos geológicos, que assegurem técnicas de ocupação e uso adequado do território, bem como a implementação de estratégias que garantam a conservação de sítios geológico de inegável valor científico, pedagógico, cultural, turístico ou outros que permitam promover a geoconservação do patrimônio geológico nacional e bem estar social.

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M. A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PINTO, C. P.; MARTINSNETO, M. A. (Ed.). **Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 2001. p. 9-30.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleni. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017_rel-1.pdf>. Acesso em 05 nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **HidroWeb**: sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 05 nov. 2019.
- ALVES, R. R. *et al.*, 2009. As relações existentes entre as ocorrências das formas do relevo e o uso do Solo na Bacia do Rio Grande - BA. A Geografia Física Aplicada e as Dinâmicas de Apropriação da Natureza. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa - MG. **Anais...** Minas Gerais, 2009.
- AMORIM JUNIOR, V. **Avaliação hidrogeológica do Aquífero Urucuia na bacia do rio das Fêmeas usando IP Resistividade**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 82 p. 2003.
- ANDRADE, J. B. M.; CASCAES, O. S. F. Panorama hidrogeológico do Grupo Bambuí no Oeste da Bahia. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 6, 1990. **Anais...** São Paulo: Revista Águas Subterrâneas, 1990.
- ANCHUELA, P. Ó. *et al.* Three-dimensional characterization of complex mantled karst structures. **Engineering Geology**, v.195, p. 158-172, 2015.
- ANNAN, A. P. GPR- History, Trends, and future Developments. **Subsurface Sensing Technologies and Applications**, v.3, n. 4. 2002.
- ANNAN, A. P. GPR-trends, history, and future developments. In: PROCEEDINGS OF THE EAGE CONFERENCE. **Anais...** 2001.
- ANNAN, A. P. Uses and techniques of ground penetrating radar in near-surface geophysics. In: WORKSHOP SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, SENSORS & SOFTWARE INC. Notes...1992. ANSON, C. A gruta da Sucupira e o "fator Ezio". **O Carste**, v.16, n.1, p. 22-23, 2004.
- AULER, A. S.; RUBBIOLI, E.; BRANDI, R. **As Grandes Cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Grupo Bambuí, 2001.
- BAHIA. **Decreto Municipal nº 07/2005, de 11 de janeiro de 2005, constituída pelo decreto Nº 10.020 de 05 de junho de 2006**. Cria a Área de Proteção Ambiental -

APA de São Desidério, no Município de São Desidério, e dá outras providências. Disponível em: < <http://www.inema.ba.gov.br/wp-content/uploads/2011/09/DECRETO-N%C2%BA-10.020-DE-05-DE-JUNHO-DE-2006-APA-de-S%C3%A3o-Desid%C3%A9rio.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2020.

BAHIA. Secretaria de Desenvolvimento Urbano. **Elaboração do plano estadual de manejo de águas pluviais e esgotamento sanitário – PEMAPES**. Volume 8 – RDS 11 – Oeste Baiano. Non., 2010.

BARBOSA, A.; OLIVEIRA, D. S. C.; OLIVEIRA, C.R.M. Uso tradicional da fauna silvestre no município de Lapão, Bahia. Enciclopédia Biosfera. Goiânia: **Centro Científico Conhecer**, v. 10, n. 18, p 118-133, 2014.

BECKER, M.; DALPONTE, J. C. **Rastros de mamíferos silvestres brasileiros**. Brasília, D.F: Editora Universidade de Brasília, 1991. 180 p.

BLUM, M. L. B.; RUSSO, D.; JURASZEK, I.C. GPR Forense: Investigação em Sítio Arqueológico Indígena, Porto Esperidião - MT. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA, 2010, BRASÍLIA. **Anais...** Simpósio Brasileiro de Geofísica - Resumos Expandidos, 2010.

BORGES, R. W. **Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade**. 127p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2002.

BORGES, W. R. *et al.* GPR Applied To Rigid Pavement From Santos Dumont Airport, RJ. **Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)**, v. 32, p. 225-234, 2014.

Boussinesq, L. **Essai sur la théorie des eaux courantes**. Paris: Imprimerie Nationale. 1877.

BRASIL. **Decreto 99.556 de 1º de outubro de 1990. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, e dá outras providências**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/D99556.htm

BRASIL. Lei 9.985 de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Seção 1 - 19/7/2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm> Acesso em: 02 abr.

BRASIL. **Decreto nº 5.092, de 21 de maio de 2004**. Define regras para identificação de áreas prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição dos benefícios da biodiversidade, no âmbito das atribuições do Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 21 de maio de 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5092.htm>. Acesso em: 04 abr. 2020.

BRASIL. **Decreto nº 5.758, de 13 de abril de 2006.** Institui o Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas - PNAP, seus princípios, diretrizes, objetivos e estratégias, e dá outras providências. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2006/decreto-5758-13-abril-2006-541743-publicacaooriginal-47793-pe.html>>. Acesso em: 03 mar. 2020.

BRASIL. **Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008.** Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm. Acesso em: 26 mai.2020.

BRASIL. **Decreto nº 6.848, de 14 de maio de 2009.** Altera e acrescenta dispositivos ao Decreto no 4.340, de 22 de agosto de 2002, para regulamentar a compensação ambiental. Brasília. 14 de maio de 2009. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2009/Decreto/D6848.htm>. Acesso em: 02 abr. 2020.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. **Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários:** escopos básicos/instruções de serviço. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. 484 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de implantação básica de rodovia.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2010. 617 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Pesquisa e Planejamento. **Relatório Técnico de Inspeção BR-135/BA/MG, São Desidério/BA km 208 ao km 226.** Levantamento Geofísico - Gravimetria - Detecção de Cavidades, Relatório Final, abril/2014 – DNIT/ITTI/UFPR, 28p. 2014.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Pesquisa e Planejamento. **EIA/RIMA da Ponte Sobre o Rio Corrente em Correntina-BA.** 2014.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Pesquisa e Planejamento. **Prospecção e Caracterização do Patrimônio Espeleológico da Área de Influência Direta da Implantação da BR-135/BA:** São Desidério/BA (km 207,0) a Correntina/BA (km 344,7). Relatório Final, DNIT/ITTI/UFPR, jun. 2015. 130p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Condições das rodovias.** Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/condicoes/condicoesdrf.asp?br=135&estado=bahia&drf=5>>. Acesso em: 07 fev. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Secretaria da biodiversidade e florestas. Portaria nº444 de 17 de dezembro de 2014. Lista nacional oficial de espécies da fauna ameaçadas de extinção. **Diário oficial da união**, Brasília, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Instrução Normativa Nº 2, de 30 de agosto de 2017**. Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, conforme previsto no art. 5º do Decreto no 99.556, de 1º de outubro de 1990. Disponível: http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19272154/do1-2017-09-01-instrucao-normativa-n-2-de-30-de-agosto-de-2017-19272042

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Bioma cerrado**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

BRIGGS, I. C. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, v. 1, n. 39, p. 39-48. 1974.

BRILHA, J. Patrimônio geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica. **Palimage Editores**, Braga, Portugal, 2005.

BRILHA, J. Inventário e avaliação quantitativa de geosítios e locais de geodiversidade: uma revisão. **Geoheritage**, Braga. Portugal. 2016.

BROWN, W. K.; WOHLETZ, K. H. **SFT and the Earth's Tectonic Plates**. Los Alamos National Laboratory, 2005.

CADASTRO NACIONAL DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO (CNUC). **Bioma Cerrado**. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs>>. Acesso em: 12 fev. 2020.

CAMPOS, J.E.G. **Estratigrafia, Sedimentação, Evolução Tectônica e Geologia do Diamante da porção centro-norte da Bacia Sanfranciscana**. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB), 1996.

CAMPOS, J. E.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v.27, n. 3, p. 269-282, 1997.

CAMPOS, J. E.; DARDENNE, M. A. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, v.27, n. 3, p 283-294. 1997.

CATERPILLAR. **Compactadores**. Disponível em: <http://www.cat.com/pt_br/products/new/equipment/compactors.html>. Acesso em: 27 maio. 2017.

CAXITO, F. A. **Evolução tectônica da faixa Rio Preto, noroeste da Bahia / sul do Piauí. Orientador: Alexandre Uhlein**. 2010. 167f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, Belo Horizonte, 2010.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICO DO RIO SÃO FRANCISCO (CBHSF). **Resumo executivo do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025**. Alagoas, 2016. 300p.

CHANG, H.K.; BENDER, A.A; KOWSMANN, R.O. O papel das tensões intraplaca na evolução de bacias sedimentares: exemplo da Formação Urucuia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. São Paulo. **Anais...** São Paulo, SBG, v. 2, 568-569, 1992.

CODATA. **Newtonian constant of gravitation**. Disponível em: <<https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?bg>>.

CONABIO. **Deliberação Nº 40, de 07 de fevereiro de 2006**. Dispõe sobre a aprovação das diretrizes e prioridades do Plano de Ação para implementação da Política Nacional de Biodiversidade. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/conabio/_arquivos/Delib_040.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Boletim estatístico CNT**. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/boletim/boletim-estatistico-cnt>>. Acesso em: 23 jun. 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 347**. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Brasília, 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 347, de 10 de setembro de 2004. **Diário oficial da União**, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, 13 set. 2004. nº 176. P 54-55.

COSTA M.T.; SAD, J.H.G. O Cretáceo em Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 22, Belo Horizonte. **Anais...** Brasil, Resumo de Comunicações. p. 23-36. 1968.

CPRM. **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Folha Brasília SD 23**. Rio de Janeiro: CPRM, 2010. Escala: 1:1.000.000.

CPRM. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Nova Carta ao Milionésimo do Brasil. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Sistema de Informações Geográficas-SIG**. 2002. CD-ROM.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Projeto Geoparques**. Disponível em: www.cprm.gov.br. Acesso em setembro de 2016.

DANIELS, J. J. Fundamentals of Ground Penetrating Radar. In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 2. Golden. In: **Proceedings.**, Golden: SAGEEP'89, 62 -142p. 1989.

DAS, BRAJA M. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. 6 ed. São Paulo: Thomson, 2007. 562 p.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical prospecting**, v. 37, n. 5, p. 531-551. 1989.

DEUTSCHE NORM DIN-4150-3. **Structural Vibration Part 3: effects of vibration on structures**, 1999.

DRUMM, E. C.; AKTÜRK, Ö.; AKGÜN, H.; TUTLUOGLU, L. Stability Charts for the Collapse of Residual Soil in Karst. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, jul., 2009.

EGYDIO-SILVA M. 1987. **O sistema de dobramentos Rio Preto e suas relações com o Cráton São Francisco**. Tese (Doutorado) - IGCUSP, São Paulo, 95 p.

EGYDIO-SILVA M., KARMANN I., TROMPETTE R.R. Litoestratigrafia do Supergrupo Espinhaço e Grupo Bambuí no noroeste do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 19, n. 2, p. 101-112, 1989.

PALMA FILHO, E. A. Caracterização da distribuição de tensões e deslocamentos em túneis duplos rasos. **Lume**, Cidade, nov., 2006.

FELFILI, J. M.; SOUSA-SILVA, J. C.; SCARIOT, A. (Org.) Diversidade alfa e beta no cerrado sensu stricto, Distrito Federal, Goiás, Minas Gerais e Bahia. Cerrado: Ecologia, biodiversidade e conservação. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2005. p. 141-154.

FRANCO, B. O. M. **Uso de sistema computacional em projeto de solo grampeado**. Tese (Mestrado) - Engenharia geotécnica, UFPO, 2010.

FACULDADE DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E FUNDAÇÕES. Disponível em:
<<http://www.eng.uerj.br/~denise/pdf/compressibilidadeadensamento.pdf>>.
Acesso em: 16 out. 2017.

GALVÃO, *et al.* Breve descrição do patrimônio espeleológico do município de São Desidério – BA. **Revista Brasileira de Espeleologia**, v,2, n.1, 2012.

GASPAR, M.T. P. **Sistema Aquífero Urucua: Caracterização Regional e Propostas de Gestão**. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, 158 p. 2006.

GEOSONIC. **Safeguard Seismic Unit 3000 EZ plus. Portable Seismograph**. 2011. Disponível em:
http://www.geosonicsvibratech.com/images/stories/pdf/3000EZPlus_Manual.pdf.
Acesso em: 20 mar. 2020.

GERENTEC ENGENHARIA. **Plano Municipal de Saneamento de São Desidério-BA**. Relatório Final do PMSB de São Desidério. Novembro, 2015.

GILLIESON, D. S. **Caves: processes, development, management**. Malden: Blackwell Publishers, 1996.

GODINHO, L. P. S.; PEREIRA, R. G. F. A. Caracterização geomorfológica preliminar do sistema cárstico do Rio João Rodrigues, São Desidério – BA. In: RASTEIRO, M.A.; MORATO, L. (orgs.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32,

2013. Barreiras. **Anais...** Campinas: SBE, 2013. p.341-351. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais32cbe/32cbe_341-351.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2014.

GRAY, M. **Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature**. Chichester: Wiley, 2004. 434 p.

GROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. **Geophysics**, v. 55, n. 12, p. 1613-1624. 1990.

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a terra**. 6. ed. Tradução: ABREU, I. D. Porto Alegre: Bookman, 2013.

HEISKANEN, W. A.; MORITZ, H. **Physical Geodesy, second Edition**. San Francisco: Freeman Press, 1967.

HERZOG, S. K.; KESSLER, M.; CAHILL, T. M. Estimating species richness of tropical bird communities from rapid assessment data. **The Auk**, v. 119, n. 3, p. 749. 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/271787252_Estimating_Species_Richness_of_Tropical_Bird_Communities_from_Rapid_Assessment_Data>. Acesso em: 02 set. 2019.

HIDROGEOLOGIA E MEIO AMBIENTE (HIDROVIA). **Recursos Hídricos Subterrâneos. Subsídios para delimitação das zonas de contribuição hídrica para o Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues – SCJR- São Desidério/ BA**. Instituto Ekos, 2012.

IBAMA. **Portaria IBAMA nº 887, de 15 de julho de 1990**. Dispõe sobre o uso das cavidades naturais subterrâneas. Disponível em: <<http://www.cavernas.org.br/leis/port88790.htm>>. Acesso em: 06/08/2016.

IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p.

IBGE. **Cidadea@**. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas. **II Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Minas Gerais, 2010.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas. **Oficina sobre Áreas de Influência de Cavidades Naturais Subterrâneas – Relatório Final**. Brasília: ICMBio, 2013.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas. **Base de**

Dados Geoespacializados. Disponível em <http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/mapas.html>. Acesso em: 10 jan. 2019.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas. Área de Influência sobre o Patrimônio Espeleológico - Orientações Básicas à **Realização de Estudos Espeleológicos**. Brasília: ICMBio, 2015.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas. **Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: orientações básicas à realização de estudos ambientais**. Brasília: ICMBio, 2016. 55 p.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas. **III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: ICMBio, 2011. 197 p.

INSTITUTO LACTEC. Ensaio para Determinação da Resistência a Compressão e Módulo Estatístico em Amostra de Rocha Relatório. **Rel DVPE 2794/2014-R1**, 2014. Curitiba – Pr.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (INEMA). **Sistema Estadual de Informações Ambientais e de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://monitoramento.seia.ba.gov.br/>>. Acesso em: 20. jul. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS RENOVÁVEIS (IBAMA). Portaria IBAMA nº 887/1990. **Diário Oficial**, n.117, de 20 jun. 1990, Seção I, p. 11844

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Diário oficial da União**, n. 140, Seção 1, p. 62, 2013. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0013-190713.pdf>> Acesso em: 03 mar. 2020.

JUNIOR, J. S. da S.; FERREIRA, F. J. F.; STEVANATO, R. Aplicação dos métodos gravimétrico e eletroresistivimétrico-IP em área de risco geotécnico do sistema aquífero cárstico em Almirante Tamandaré-PR. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 24, n. 3, jul./set. 2006. Disponível em: <https://goo.gl/EcCdp9>.

JOL, H.M. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. **Elsevier Science**, Oxford, 2009, p. 402.

KANE, M. F. A Comprehensive System of Terrain Corrections Using a Digital Computer. **Geophysics**, v. 27, n. 4, p. 455-462. 1962.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. Tradução: COELHO, M. C. M. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KATTAH, S. S. **Análise Faciológica e Estratigráfica do Jurássico/Cretáceo Inferior da Porção Meridional da Bacia do São Francisco, oeste do Estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado) - UFOP, Ouro Preto, 1991.

KNODEL, K.; LANGE, G.; VOIFT, H. J. Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies. **Springer**, Germany, 2007, p. 1357.

LABORATÓRIO DE ANÁLISES DE MINERAIS E ROCHAS (LAMIR). **Certificado de análise nº 2014-1114 de 25/08/2014**. Curitiba – PR, 2014.

LOBO, H. A. S. *et al.* Carste da região de São Desidério (Bahia, Brasil): proteção ambiental e gestão territorial. In: RASTEIRO, M.A.; MORATO, L. (orgs.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32, 2013. Barreiras. **Anais...** Campinas: SBE, 2013. p.353-362. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais32cbe/32cbe_353-362.pdf. Acessado em: 20 out. 2019.

LONGMAN, I. M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, n. 12, dec. 1959.

LOPES, L. S.O.; ARAÚJO, J. L. L. Princípios e Estratégias de Geoconservação. **Revista Eletrônica de Geografia**, v. 03, n. 07, p. 66-78, 2011.

LUNARDI, P. **Projeto e construção de túneis segundo o método baseado nas análises das deformações controladas nas rochas e nos solos**. Traduzido por Marcelo Pucci e Paolo Mosicci. São Paulo, 1995.

LUZ, C. C. *et al.* **Utilização de pavimento rígido como forma de minimizar vibrações em área cárstica - Estudo de Caso: BR-135/BA (São Desidério/BA)**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 44; ENACOR, 18, 2015, Foz do Iguaçu. **Anais...** 44 Reunião Anual de Pavimentação e 18º ENACOR, 2015.

LUZ, C. C.; NASCIMENTO NETO, D.; RATTON, E.; CARDOSO, S. H.; SOUZA JUNIOR, T. F. **Técnicas de identificação e análise de estruturas geológicas associadas à relevos cársticos visando a implantação de empreendimentos rodoviários**. 2017. (Apresentação de Trabalho/Simpósio).

LUZES NA ESCURIDÃO. Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério: o lago Secou. Disponível em: http://luzesnaescuridao.com.br/_site/2016/08/14/buraco-do-inferno-da-lagoa-do-cemiterio-o-lago-secou/. Acesso em: 20 abr. 2017.

MARTINS, M.; TEIXEIRA, L.B. E BRAUN, O.P.G. Bacia do São Francisco: uma fronteira exploratória na pesquisa de petróleo do Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 7. **Anais...** Ouro Preto, SBG. p. 55-57, 1993

MLENEK, D. C, F. C. *et al.* Modelagem tridimensional da Caverna Buraco do Inferno na Rodovia BR-135 no município de São Desidério – BA. In: Anais do XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 27; EXPOSICARTA, 26, 6 a 9 de novembro de 2017. **Anais...** SBC, Rio de Janeiro - RJ, p. 193-197.

NADAL, C. A. *et al.* Determinação da Espessura do Terreno na Parte Superior de Caverna de Alta Relevância na BR-135 por Métodos Gravimétricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 48, 2016, Porto Alegre. **Anais... Resumos do 48º Congresso Brasileiro de Geologia**, 2016.

NADAL, C. A.; LUZ, C. C.; ZONTA, J. T.; RATTON, E.; NASCIMENTO NETO, D. Técnicas para Mitigação do Colapso de Evolução de uma Dolina de Colapso Ovalada. In: SEMANA OFICIAL DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 73, 2016, Foz do Iguaçu. **Anais ...73º Semana Oficial da engenharia e da Agronomia**, 2016.

NASCIMENTO, M.; AZEVEDO, U. R.; MANTESSO-NETO, N. **Geodiversidade, Geoconservação e Geoturismo**: trinômio importante para a conservação do patrimônio geológico. Rio de Janeiro: Edição SBGeo, 2008. 84 p.

NASCIMENTO NETO, D. Metodologia e estratégias para a conservação de patrimônio espeleológico. In: SEMINÁRIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA, 19, 2016, Curitiba. **Anais... Seminário do Programa de Pós-graduação em Geologia**, 2016.

NASCIMENTO NETO, D.; FERNANDES, L. A.; LUZ, C. C.; RATTON, E. Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado - Vant - Como Ferramenta na Prospecção Espeleológica. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 10, 2017, Curitiba. **Anais ...2017**

NASCIMENTO NETO, D. **Método de Determinação do Limite de Segurança Estrutural de Patrimônio Espeleológico em Sistemas Cársticos Carbonáticos**. Curitiba: UFPR, 2017. (Apresentação de Trabalho/Seminário).

NAGY, D. The Prism Method for Terrain Corrections Using Digital Computers. **Pure Appl. Geophys**, v. 63, p. 31-39. 1966.

NORMA PORTUGUESA NP 2074. **Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares**. Lisboa: Instituto Português da Qualidade (IPQ), 1983.

PARASNIS, D.S. Principles of applied geophysics. **Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row**, London SE1 8HN, UK. 429p. 1997.

OLHOEFT, G. R. Applications and limitations of ground penetrating radar. In: SEG TECHNICAL PROGRAM. Expanded Abstracts. **Society of Exploration Geophysicists**, p. 147-148. 1984.

OLHOEFT, G. R. **Application of ground penetrating radar**. Proc. GPR, p. 1-3. 1996.

OLIVEIRA, A. M. S; MOTICELI, J. J. **Geologia de Engenharia e Ambiental. 2 v.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE, 2018.

PARASNIS, D. S. **Principles of applied geophysics**. Lodon: Chapman & Hall. 1997.

PARIZI, A. C. Abufelando em São Desidério. **O Carste**. v.17. n.1, 2005. 22-29p.

PASSO, D. P. *et al.* Caracterização Geomorfológica do município de São Desiderio, BA, escala 1:50.000. Embrapa Cerrado – Planaltina/GO, 2010. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cpac.embrapa.br%2Fdownload%2F1730%2Ft&ei=IBMeU8b2LdKjkQeK6YHYCg&usq=AFQjCNFBIXhpKZ-HaVEI-msqPiaPTNaP3Q>. Acesso em: 06 mar. 2014.

PATTON, J. L.; PARDIÑAS, U. F. J.; ELÍA, G. **Mammals of South America, volume 2**. Chicago: University of Chicago Press: 2015.

PEREIRA, R. G. F. A.; FIGUEIREDO JR., S. M.; FEITOSA., G. D. S. **Geoparque São Desidério, BA**: proposta. 2018. Relatório interno – <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20724>.

PILÓ, L. B. Geomorfologia Cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, n. 1. p. 88-102. 2000.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORSANI J.L., BORGES W.R., RODRIGUES S.I., HODO F.Y. O sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP: instalação e resultados GPR2D-3D. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.24, n.1, 2006b. p.49-61.

PORSANI, J. L. **Ground Penetrating Radar (GPR)**: proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 145p. 1999.

ROBINSON, E.; CORUN, C. **Basic Exploration Geophysics**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

RUBBIOLI, E. L. São Desidério a fronteira final. **O Carste**, v.9, n.3, p.46-56, 1997

RUBBIOLI, E. L. A garganta do Bacupari e o Sistema do João Rodrigues; São Desidério – Bahia. **O Carste**, v.16, n.1, p.13-17, 2004.

RUBBIOLI, E. L. O Buraco da Sopradeira. **O Carste**, v.16, n.1, p.27-29, 2004.

RUBBIOLI, E.; AULER, A.; MENIN, D.; BRANDI, R. **Cavernas-Atlas do Brasil Subterrâneo**. Brasília, DF: ICMBio. 2019.

SANDMEIER, K. J. **ReflexW 2D GPR Data Analysis Module Manual**. Sandmeier Geophysical Software Research. 2010.

SANTOS, C. A. P.; SOUZA, J. S; SOUZA, A. L. A; SANTOS, V. C. P.. O papel das políticas pública na conservação dos recursos naturais. **Revista Geografia Acadêmica**. v.10, n. 2, 2016.

SANTOS, C. J. S. **Fundo de Pasto: tecitura da resistência, rupturas e permanências no tempo-espaço desse modo de vida camponês**. 2010. 290f. Tese (Doutorado em Geografia Humana) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Humana da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SARMENTO-SOARES, L. M. et al. First record of genus *Imparfinis* from a northeastern coastal Brazilian river basin: *I. borodini* Mees & Cala, 1989 in Rio de Contas, Bahia. **Check List**, v. 12, n. 1, 2016.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS, SANEAMENTO E HABITAÇÃO (SRSH). Documento Síntese. In: PLANO Diretor de Recursos Hídricos: Bacia do rio Grande. Salvador: Higesa, 1993. 166 p.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA, IRRIGAÇÃO, PESCA E AQUICULTURA - BAHIA. **O potencial de crescimento da produção de grãos no oeste da Bahia**. Disponível em: <http://www.seagri.ba.gov.br/sites/default/files/socioeconomia2_v7n2_0.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2017.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA, IRRIGAÇÃO, PESCA E AQUICULTURA - BAHIA. **Lista Vermelha da Bahia: Avaliação do Estado de Conservação da Fauna e Flora do Estado da Bahia**. 2019. Disponível em: <<http://www.listavermelhabahia.org.br/categoria-anfibios.html>>. Acesso em: 12 set. 2019.

SGARBIN, G. N. C. **Geologia da Formação Areado. Cretáceo Inferior a Médio da Bacia Sanfranciscana, Oeste do estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado) - Rio de Janeiro (UFRJ). 1989.

SGARBIN, G.N.C. **Petrografia e geoquímica da Fm. Mata da Corda na região de Carmo do Paranaíba, oeste de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado) - UFRJ. 1991.

SGARBIN, G. N. C. The Cretaceous Sanfranciscan Basin, Eastern Plateau of Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30 (3): 450-452. 2000.

SGARBIN, G. N. C. *et al.* Bacia Sanfranciscana: o Registro Fanerozóico da Bacia do São Francisco. In: PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, SBG/ MG, p. 93-138, 2001.

SHARPLES, C. Concepts and Principles of Geoconservation. **Tasmanian Parks & Wildlife Service**, Austrália, 79 p. 2002.

Geologia e Recursos Naturais. SBG/MG – Belo Horizonte, p. 93-138. 2001.

SILVA A. B. **Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais**. Orientador: Sérgio Estanislau do Amaral. 1984. 190 f. Tese (doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 1984.

SILVEIRA JUNIOR, J.S. **Aplicação dos métodos gravimétrico e eletrorresistivimétrico na interpretação geofísica de áreas localizadas no Sistema Aquífero Cárstico em Almirante Tamandaré-PR**. 2006. 127 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) - Curso de Pós-Graduação em Geologia Ambiental, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 2006.

SPIGOLON A. L.; ALVARENGA, C. J. S. Fácies e elementos arquiteturais resultantes de mudanças climáticas em um ambiente desértico: Grupo Urucuia (Neocretáceo), Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, v.32, n.4, p.579 – 586. 2002.

STEVANATO, R.; CANATA, R. E. **Projeto BR135 – São Desidério e Correntina – BA. Polarização Induzida e Resistividade na detecção de cavidades LPG& ITTI, Curitiba, Brasil**. 2016. 24 p.

STEVANATO, R. *et al.* Resistivity and induced polarization applied to “Buraco do Inferno” Cave, São Desidério, State of Bahia, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 16, 2019, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBGf, 2019.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA. **As maiores cavernas do Brasil**. Disponível em: <http://www.sbe.com.br/cavernas_maiores.asp>. Acesso em: 15 maio. 2017.

TAVARES, J. M. R. S. **Introdução ao método dos elementos finitos**. Porto> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1998. 103 p.

TEIXEIRA NETTO, A. S. Bacias Paleozoicas e Mesozoicas. In: BARBOSA, J. S. F. **Geologia da Bahia: pesquisa e atualização**, 2. v. Salvador: CPRM, 2012. p. 223-254.

TECHNOS INC. Characterizing Karst and Pseudokarst. **Technical Report**, v. 4, p. 12, 2005. Disponível em: <<http://www.technos-inc.com>>. Acesso em: 02 fev. 2018.

TELFORD, W. M. **Applied Geophysics**. 2. ed. Cambridge University: Press New York, 1990.

TRAVASSOS, L. E. P.; RODRIGUES, B. D.; TIMO, M. B. **Glossário conciso e ilustrado de termos cársticos e espeleológicos**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2015.

VESTANA, L. R.; KOBAYAMA, M.; SANTOS, L. J. C. Considerações sobre gestão ambiental em áreas cársticas. **RA' EGA (UFPR)**, v. 4, n.6, p. 81-94, 2002.

UNI 9916. **Norma italiana – Criteri di Misura e Valutazione Degli Effetti Delle Vibrazioni Sugli Edifici.**1991.

ZALÁN, P. V.; ROMEIRO-SILVA, P. C. Bacia do São Francisco. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n.2, p.561-571. 2007.

ZAMPIERI, M. **Estudo geotécnico de tensões e deformações no solo na presença de cavidades subterrâneas ao longo da BR-135/BA, trecho São Desidério a Correntina.** 105f. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ZONTA, J. T. *et al.* Utilização de veículo aéreo não tripulado - VANT como ferramenta auxiliar na identificação e quantificação de áreas degradadas na faixa de domínio de rodovias. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 11, 2017. **Anais.** Curitiba. Anais do XI Simpósio Nacional de Recuperação de Áreas Degradadas, 2017.