



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DO AQUÍFERO  
CÁRSTICO DA APA DE LAGOA SANTA, MG, UTILIZANDO O MÉTODO  
COP**

**AUTOR:** Thiago de Castro Tayer

**ORIENTAÇÃO:** Prof. Leila Nunes Menegasse Velásquez

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DO  
AQUÍFERO CÁRSTICO DA APA DE LAGOA SANTA, MG,  
UTILIZANDO O MÉTODO COP

**Autor:** Thiago de Castro Tayer

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito à obtenção de título de Mestre.

**Área de Concentração:** Geologia Econômica e Aplicada

**Orientação:** Leila Nunes Menegasse Velásquez

Belo Horizonte, Maio de 2016.

T236a  
2016

Tayer, Thiago de Castro.

Avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico da APA de Lagoa Santa, MG, utilizando o método COP [manuscrito] / Thiago de Castro Tayer. – 2016.

xiii, 146 [12] f., enc. (principalmente color.)

Orientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2016.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 137-146.

Inclui anexos e apêndices.

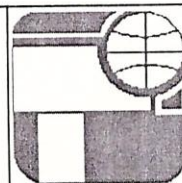
1. Aquíferos – Santa Luzia (MG) – Teses. 2. Carste – Santa Luzia (MG) – Teses. 3. Impacto ambiental – Santa Luzia (MG) – Teses. 4. Hidrogeologia – Teses. 5. Geoprocessamento – Teses. I. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556.3 (815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico da APA de Lagoa Santa, MG, utilizando o método COP

**THIAGGO DE CASTRO TAYER**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

Aprovada em 25 de maio de 2016, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof(a). Leila Nunes Menegasse Velásquez - Orientador  
UFMG

  
Prof(a). Maria Antonieta Alcantara Mourão  
CPRM

  
Prof(a). Paulo César Horta Rodrigues  
CDTN/CNEN

Belo Horizonte, 25 de maio de 2016.

*Everything must be made as simple as possible, but not simpler.*

*—Albert Einstein*

## Agradecimentos

A minha avó Maria, por ser meu porto seguro em todas as situações. Meu avô Naief que, mesmo não estando mais aqui continua a inspirar. Mãe, Tia Kátia, Pai e a todos os familiares e amigos pelo apoio e paciência.

A professora e amiga Leila Menegasse, com imensa gratidão, pela orientação, profissionalismo, disponibilidade e, é claro, pelas longas conversas. Apesar das divergências, foi possível atingir com foco e multidisciplinaridade o sucesso desse estudo.

A Maria Antonieta Mourão meu agradecimento pela amizade, orientação científica e profissional, e pela oportunidade de tê-la como exemplo de profissional. Obrigado por despertar em mim a motivação para a busca dessa ciência que se tornou tão importante em minha vida.

Paulo César Horta Rodrigues, pela revisão minuciosa desse trabalho, pelas críticas construtivas e pelo pensamento analítico que me fez refletir sobre grande diversidade de assuntos.

Ursula Ruchkys pelos comentários e sugestões ao longo do trabalho e pela ajuda na banca de qualificação.

Aos Professores Jarbas Dias Lima Sampaio e Lúcia Fantinel pela ajuda nos pepinos de geoprocessamento e de geologia.

Aos parceiros Aurélio, Moises e Amanda pelas risadas e disposição nos trabalhos de campo.

Aos amigos Arthur Hilário e Pedro Casagrande pelas conversas regadas a geoprocessamento, geologia e malte.

Um agradecimento especial a todos os amigos, professores e profissionais não citados, porém não esquecidos que fizeram parte direta ou indiretamente dessa caminhada.

Ao programa de geologia de pós-graduação da Universidade Federal de Minas Gerais; ICMBIO pelo apoio financeiro e à CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

# SUMÁRIO

1. Introdução .....	1
1.1. Objetivo Geral e Específicos .....	2
1.2. Justificativa do Tema.....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	6
2.1. Sistemas Aquíferos Cársticos .....	6
2.1.1. Principais Características .....	6
2.1.2. Processos Químicos e Físicos de Formação.....	7
2.1.3. Dinâmica de Recarga e Fluxo Subterrâneo .....	10
2.2. Mapeamento e Avaliação da Vulnerabilidade.....	12
2.2.1. Métodos para a Avaliação da Vulnerabilidade.....	14
2.2.2. Métodos com Ferramentas Específicas para Avaliação da Vulnerabilidade em Aquíferos Cársticos .....	16
3. Materiais Empregados .....	23
3.1. Dados Primários .....	23
3.2. Dados Secundários .....	24
3.3. Imagens de Satélite.....	26
3.3.1. SRTM .....	26
3.3.2. LANDSAT 8 .....	27
4. Caracterização da Área de Estudo .....	29
4.1. Aspectos Gerais .....	29
4.2. Condições Climáticas .....	31
4.3. Hidrografia .....	33
4.4. Geologia .....	35
4.5. Hidrogeologia.....	41
4.6. Solos .....	45
4.7. Cobertura Vegetal.....	48
4.8. Zoneamento Ambiental e Uso do Solo.....	49
5. Métodos Aplicados .....	54

5.1. Método COP.....	54
5.1.1. Fator C – Concentração de Fluxo.....	55
5.1.2. Fator O – Camadas Sobrepostas.....	56
5.1.3. Fator P – Precipitação.....	57
5.2. Mapeamento Semiautomático de Dolinas.....	60
5.3. Identificação de Áreas com Vegetação Representativa.....	75
5.4. Modelagem da Superfície Freática.....	79
5.5. Modelagem Geológica.....	85
6. Aplicação e Resultados do Método COP para a Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca.....	90
6.1. Fator “C” – Concentração de Fluxo.....	90
6.1.1. Distância até as Feições Cársticas de Recarga ( <i>dh</i> e <i>ds</i> ).....	90
6.1.2. Feições Superficiais ( <i>sf</i> ).....	95
6.1.3. Declividade e Vegetação ( <i>sv</i> ).....	99
6.1.4. Cálculo do Fator “C”.....	107
6.2. Fator “O” – Camadas Sobrepostas.....	111
6.2.1. Solos ( <i>Os</i> ).....	111
6.2.2. Litologia ( <i>Ol</i> ).....	118
6.2.3. Cálculo do Fator “O”.....	121
6.3. Fator “P” – Precipitação.....	122
6.3.1. Precipitação ( <i>Pq</i> ).....	125
6.3.2. Intensidade de Precipitação ( <i>Pi</i> ).....	126
6.3.3. Cálculo do Fator P.....	126
7. Cálculo do Índice COP e Mapa Final da Vulnerabilidade.....	129
8. Discussão dos Resultados.....	131
9. Conclusões e Recomendações.....	135
10. Referências Bibliográficas.....	137



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais feições encontradas em um ambiente cárstico desenvolvido .....	6
Figura 2: Distribuição das grandes bacias de rochas carbonáticas no mundo (em vermelho).....	7
Figura 3: Padrão de circulação das águas em área cárstica. ....	11
Figura 4: Recargas alogênica e autogênica em ambiente cárstico. ....	12
Figura 5: Ilustração dos parâmetros e valores associados ao método PI. ....	22
Figura 6: Dados coletados em campo. ....	24
Figura 7: Localização da APA Carste Lagoa Santa com vias de acesso, manchas urbanas, sedes municipais. ....	30
Figura 8: Mapa da Hidrografia da APA Carste de Lagoa Santa. ....	34
Figura 9: Limites do Cráton São Francisco. ....	35
Figura 10: Arcabouço tectônico da porção sul do cráton São Francisco .....	36
Figura 11: Mapa geológico da APA Carste de Lagoa Santa adaptado de CPRM (2003). ....	37
Figura 12: Coluna litoestratigráfica sintetizada do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa.	40
Figura 13: Mapa de potencialidade aquífera para a APA Carste de Lagoa Santa. ....	43
Figura 14: Mapa potenciométrico e das zonas aquíferas da APA Carste de Lagoa Santa. ....	44
Figura 15: Mapa de solos da APA Carste de Lagoa Santa. ....	46
Figura 16: Zoneamento Ambiental da APA Carste de Lagoa Santa. ....	50
Figura 17: Fluxograma dos métodos aplicados. ....	54
Figura 18: Fluxograma geral de aplicação para o método de avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos cársticos – COP .....	59
Figura 19: Fluxograma simplificado das etapas do método de Rodrigues (2011) aplicadas neste estudo. ....	61
Figura 20: Mapa de topos de morro (esq.) e depressões (dir.) sem filtros pelo método semiautomático. ....	63
Figura 21: Mapa final de dolinas pelo método semiautomático de identificação de depressões.....	67
Figura 22: Mapa geológico e de depressões geradas via SRTM com pontos visitados em campo (esq.). A direita fotos demonstrativas. ....	68
Figura 23: Mapa de dolinas mapeada por IBAMA (1998) sobreposto a mapa de depressões geradas nesse trabalho (esq.), e mapa da interseção entre os dois mapas (dir.).....	74
Figura 24: Faixas NDVI sugeridas por Bitencourt et al. (1997) (Esq.) e Lopes et al. (2009) (Dir.), aplicadas a área de estudo. ....	78
Figura 25: Modelo esquemático das zonas de um aquífero cárstico e o comportamento dos fluxos da água subterrânea.....	79
Figura 26: Poços tubulares e cisternas com, e sem, informações de Nível Estático (ne). ....	80

Figura 27: Mapa potenciométrico da superfície freática (esq.) e mapa de profundidade do nível d'água freático (dir). .....	82
Figura 28: Visualização 3D da superfície freática em comparação com a superfície hipsométrica..	83
Figura 29: Mapa de linhas equipotenciais gerado pelo autor (esq.) e por IBAMA (1998)(dir.). ....	84
Figura 30: Mapa com as variáveis de entrada para o modelo geológico básico e localização das seções verticais. ....	86
Figura 31: Seções geológicas verticais. ....	88
Figura 32: Modelo de Blocos 3d, exemplo da representação dos sólidos (embasamento, formação Serra de Santa Helena e formação Sete Lagoas). ....	89
Figura 33: Mapa final do parametro ds – distância dos cursos d'água diretamente conectados com o meio subterrâneo. ....	92
Figura 34: Exemplo de sumidouro na região do Mocambeiro. ....	93
Figura 35: Mapa final do parametro dh – distância até os sumidouros. ....	94
Figura 36: Mapa final do subfator sf (feições superficiais). ....	98
Figura 37: Vista geral das densidades vegetacionais consideradas no subfator sv.....	102
Figura 38: Baixa Densidade Vegetacional (1) .....	102
Figura 39: Alta Densidade Vegetacional (3) .....	102
Figura 40: Vegetação Esparsa (2) .....	102
Figura 41: Mapa final da densidade vegetação considerando as faixas propostas por Leyland (2008), gerado via NDVI.....	103
Figura 42: Mapa de declividade da área .....	105
Figura 43: Mapas do subfator sv representados em cada um dos cenários. ....	106
Figura 44: Mapa de redução da proteção relacionado ao cenário 1 – Recarga direta. ....	108
Figura 45: Mapa de redução da proteção do cenário 2 – Recarga difusa. ....	109
Figura 46: Mapa final de redução da proteção para o Fator C (concentração de fluxo).....	110
Figura 47: Pontos de amostragem de solos.....	112
Figura 48: Mapa de profundidades do solo (esq.), e de textura do solos (dir.).....	115
Figura 49: Mapa do subfator “Os” - solos .....	117
Figura 50: Mapa final do subfator OL – Litologia.....	120
Figura 51: Mapa final de proteção para do Fator “O” – camadas sobrepostas.....	121
Figura 52: Estações Pluviométricas selecionadas e municípios da área de influência. ....	124
Figura 53: Representação do mapa do subfator Pq (esq.) e Pi (centro). À direita o mapa final do fator ‘P’ .....	128
Figura 54: Mapa final de vulnerabilidade para a APA Carste de Lagoa Santa pelo método COP..	130

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Dados climatológicos da estação Sete Lagoas. ....	33
Gráfico 2: Influência da precipitação na vulnerabilidade de aquíferos, pelos agentes de transporte e diluição, de acordo com a Metodologia COP. ....	58
Gráfico 3: Histograma de frequências dos índices de circularidade via fotointerpretação IBAMA (1998). ....	72
Gráfico 4: Histograma de frequências dos índices de circularidade via método semiautomático. ....	73
Gráfico 5: Histograma de frequências da espessura das amostras de solo. ....	113
Gráfico 6: Relação textural das amostras de solo. ....	114
Gráficos 7, 8 e 9: Dados das estações pluviométricas selecionadas. ....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reações de dissociação e solubilidade de alguns minerais representativos que dissolvem congruentemente em água, aos 25°C e 1 bar (105 Pa) de pressão. ....	9
Tabela 2: Algumas definições utilizadas para a vulnerabilidade de aquíferos ao longo do tempo. ...	13
Tabela 3: Classificação das classes do subfator Epicarste (E). ....	17
Tabela 4: Classificação dos atributos do subfator Camada de Proteção (P). ....	18
Tabela 5: Valores dos atributos do subfator I e caracterização das condições de infiltração. ....	19
Tabela 6: Valores das classes e caracterização do desenvolvimento da rede cárstica. ....	20
Tabela 7: Fatores e valores relacionados para o método PI. ....	22
Tabela 8: Dados coletados em campo. ....	23
Tabela 9: Bandas espectrais presentes na imagem Landsat 8. ....	27
Tabela 10: Dados da estação climatológica “Sete Lagoas”, no município de Sete Lagoas (MG). ...	32
Tabela 11: Principais unidades litoestratigráficas da APA Carste de Lagoa Santa. ....	38
Tabela 12: Mudanças de nomenclatura referentes aos solos encontrados na área. ....	45
Tabela 13: Principais classes de vegetação com ocorrência na APA Carste de Lagoa Santa. ....	48
Tabela 14: Zonas Ambientais da APA Carste e suas funções. ....	51
Tabela 15: Síntese dos valores finais dos principais fatores do método COP, e do índice final COP. ....	58
Tabela 16: Casos especiais identificados na interpretação preliminar do mapa de depressões. ....	64
Tabela 17: Casos especiais identificados na comparação entre dolinas mapeadas por IBAMA (1998) e método utilizado. ....	69
Tabela 18: Índices de circularidade das feições mapeadas. ....	72
Tabela 19: Relação entre áreas de interseção entre os dois mapas. ....	75
Tabela 20: Índices NDVI dentro dos limites da área de estudo. ....	76

Tabela 21: Comparação entre faixas NDVI propostas Bitencourt et al. (1997) e Lopes et al. (2009). .....	77
Tabela 22: Distribuição de poços e informação de nível estático por município dentro dos limites da área. ....	81
Tabela 23: Distribuição de poços por município dentro do buffer considerado e número de perfis geológico e construtivo. ....	85
Tabela 24: Distribuição de valores da variável ds .....	91
Tabela 25: Comparação dos valores e distâncias consideradas por Vías et al. (2002) e Leyland (2008). .....	93
Tabela 26: Valores e feições consideradas no subfator Feições Superficiais (sf). ....	95
Tabela 27: Associação das situações das coberturas encontradas na área com os valores sugeridos por Vías et al. (2002). ....	96
Tabela 28: Comparação entre os valores atribuídos aos parâmetros declividade e vegetação por Vías et al. (2002) e Leyland (2008) no cenário 1 - Áreas de recarga direta do aquífero sob influência de sumidouros. ....	100
Tabela 29: Comparação entre os valores atribuídos aos parâmetros declividade e vegetação por Vías et al. (2002) e Leyland (2008) no cenário 2 – Recarga difusa e demais áreas do aquífero. ....	101
Tabela 30: Agrupamento das fitofisionomias por densidades de vegetação segundo método COP modificado e os limites máximo e mínimo das faixas NDVI. ....	101
Tabela 31: Faixas de declividade determinadas pelo método COP e sua representatividade na área. .....	104
Tabela 32: Classificação textural do solo segundo método COP. ....	111
Tabela 33: Valores atribuídos a combinação da espessura e textura do solo. ....	111
Tabela 34: Profundidade final dos perfis e tradagens analisados por CPRM, 1998. ....	113
Tabela 35: Média textural dos horizontes de cada perfil em %. ....	114
Tabela 36: Descrição e enquadramento das litologias encontradas na área com os valores determinados em Vías et al. (2002) para o subfator <i>OL</i> . ....	119
Tabela 37: Estações avaliadas para o cálculo do Fator P. ....	122
Tabela 38: Área de influência das estações pluviométricas, precipitação média e número de dias de chuva. ....	125
Tabela 39: Anos considerados úmidos utilizados por estação pluviométrica. ....	125
Tabela 40: Médias anuais da precipitação e valores atribuídos ao subfator <i>Pq</i> . ....	126
Tabela 41: Variáveis do subfator <i>Pi</i> e valores de intensidade de precipitação. ....	126
Tabela 42: Valores dos subfatores <i>Pq</i> e <i>Pi</i> . ....	126
Tabela 43: Descrição da vulnerabilidade para os limites do índice COP final. ....	129

## RESUMO

O presente estudo utilizou o método COP e a tecnologia GIS para investigar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero não confinado da unidade de proteção ambiental Carste de Lagoa Santa, localizada no Estado de Minas Gerais, Brasil. O Carste de Lagoa Santa é de grande importância pelo elevado número de ocorrências relacionadas à paleontologia, à arqueologia e à espeleologia do Brasil. É uma região que depende quase totalmente das águas subterrâneas e sofre pressão pelo desenvolvimento econômico desordenado. Assim, é fundamental identificar as áreas mais vulneráveis onde a infiltração de contaminantes é facilitada. O principal objetivo deste estudo foi o de gerar um mapa de vulnerabilidade intrínseca do aquífero cárstico à contaminação (escala 1:50.000) para subsidiar a implantação de uma rede de monitoramento das águas subterrâneas na área e auxiliar na gestão consciente dos recursos hídricos subterrâneos. O índice de vulnerabilidade foi avaliado pela análise de parâmetros do modelo COP através de técnicas de geoprocessamento. No entanto, a fim de adaptar o método às condições da área estudada, mudanças na estrutura e nos valores de parâmetros de entrada (litologia e declividade/vegetação) foram necessários.

Os resultados apontaram cinco categorias de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas: muito alta (7,66%), alta (3,29%), moderada (58,77%), baixa (15,78%) e muito baixa (14,5%). Apesar do baixo percentual dos níveis de vulnerabilidade alto e muito alto, as áreas enquadradas nessas categorias devem ser especialmente consideradas pelos gestores ambientais devido à forte relação entre água superficial e subterrânea na área.

**Palavras chave:** vulnerabilidade intrínseca, aquíferos cársticos, método COP, geoprocessamento.

## ABSTRACT

This study addresses the intrinsic groundwater vulnerability by using the COP method index and GIS technology on the aquifer of the Lagoa Santa karst protection unit, located in the state of Minas Gerais, Brazil. This area has a great importance due to its rich paleontology, archeology and speleology. The region is groundwater dependent and it has been suffering pressure by economic development. Therefore, it is important to identify vulnerable areas which infiltration of contaminants is likely to happen. The main goal of this study was to create an intrinsic groundwater contamination vulnerability map (scale 1:50.000), which will be used to assist the implantation of groundwater monitoring net project in the area. The index vulnerability was evaluated by analyzing COP model parameters through geoprocessing techniques. However, in order to adapt the method to the studied area conditions, changes in frame and values of input parameters weights (Lithology and Slope/Vegetation) were necessary. The outcomes showed five categories of groundwater contamination vulnerable zones: very high (7,66%), high (3,29%), moderated (58,77%), low (15,78%) and very low (14,5%). Despite the low percentage of high to the highest vulnerably level area, they must be considered by environmental managers due to strong relationship between superficial and groundwater in the area.

**Keywords:** intrinsic vulnerability mapping, karst aquifer, COP method, geoprocessing.

## 1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam uma fonte extraordinária, e muitas vezes abundante, de recursos hídricos para boa parte dos países. Ela sustenta rios, pântanos e lagos, bem como ecossistemas subterrâneos em áreas cársticas ou aquíferos aluviais. No entanto, sua inviabilização, seja por contaminação ou por escassez devido à má gestão, não só gera problemas para o meio ambiente como também para o desenvolvimento humano.

A dependência, total ou parcial, de aquíferos pela população mundial é significativa para diversos fins. Por exemplo, cerca de 23% da água doce utilizada nos Estados Unidos advêm de fontes subterrâneas (Maupin *et al.* 2014), na China o total da captação nas cidades é de 35% e na Europa a média geral é de 21%. Individualmente os países europeus possuem entre 10 – 100% de abastecimento por água subterrânea, e, com base em estimativas das Nações Unidas, entre 50-60% da população total da América Latina utiliza água subterrânea, principalmente para abastecimento doméstico e industrial (Zektser *et al.* 2004).

Segundo o Atlas Brasil – Abastecimento Urbano de Água, da ANA - Agência Nacional de Águas (ANA, 2010), 39% dos municípios brasileiros são abastecidos exclusivamente por águas subterrâneas, enquanto 14% utilizam tanto os mananciais superficiais quanto subterrâneos, e os demais 47% dependem somente de fontes superficiais.

Em nível local, o panorama na região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais, mostra uma forte dependência de recursos hídricos subterrâneos, já que, dos seis municípios que integram a área de estudo, cinco deles têm o abastecimento urbano feito 100% por água subterrânea (ANA, 2010) proveniente, principalmente, do aquífero cárstico fissural. Associa-se a isso, o fato de a área sofrer constante pressão gerada pelo desenvolvimento de atividades econômicas potencialmente degradantes, como: disposição e lançamento inadequados de resíduos e efluentes, e, o crescimento populacional e de demanda hídrica associados à expansão urbana e de atividades minerárias, industriais e agropecuárias. É de grande importância no contexto regional, pois se trata de uma área de proteção inserida, em grande parte, na linha de expansão do Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH.

Dependendo do grau de evolução dos ambientes cársticos, esses podem apresentar um relevo fluvio cárstico, responsável pela inversão da drenagem e conseqüente falta de recursos hídricos superficiais, tornando os aquíferos cársticos não somente uma opção, mas a única disponível. Essas regiões normalmente dispõem de valiosas reservas aquíferas e possuem grande importância socioambiental por abastecer a demanda hídrica dessas localidades. Entretanto, contaminações e a

diminuição da disponibilidade hídrica dos aquíferos decorrentes da expansão mal planejada (urbana, industrial ou agropecuária) podem causar riscos e limitações ao seu uso, particularmente ao consumo humano e à manutenção dos ecossistemas.

O sistema hídrico de regiões naturalmente frágeis e sujeitas ao aumento da demanda hídrica pode se deteriorar facilmente. Portanto, investigações hidrogeológicas desempenham um papel relevante para o direcionamento de programas de gestão quantitativa e qualitativa das águas. Nesse bojo, destacam-se os estudos de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, caracteristicamente preventivos, constituindo uma ferramenta relevante, pois seu produto final, o mapa de vulnerabilidade, identifica a susceptibilidade de áreas à contaminação, fornecendo amplo apoio a locação de redes de monitoramento e planejamento urbano.

As características inerentes aos tipos de aquífero condicionam diferentes graus de vulnerabilidade. Na área desse estudo, o aquífero mais intensamente utilizado é do tipo cárstico fissural, contendo as características hidrogeológicas típicas, citando-se: a complexa e rápida entrada e circulação interna através de fraturas e condutos de dissolução, e, a relação direta entre a água superficial e subterrânea por meio das feições geomorfológicas específicas, como sumidouros, dolinas e cavernas abertas à superfície.

Essas peculiaridades e complexidades específicas demandam também métodos específicos de avaliação da vulnerabilidade, isto é, que levem em consideração as características geomorfológicas e hidrogeológicas locais. É importante ressaltar que diferentes métodos aplicados a uma mesma área comumente reproduzem resultados díspares e até mesmo conflitantes entre si.

Nesse estudo será abordada uma metodologia própria para aquíferos cársticos denominada método COP (Vías *et al.* 2002; Zwahlen, 2003; Vías *et al.* 2006) visando identificar o grau de ajuste do método ao contexto hidrogeológico local, e a análise de possíveis adequações já que o método original foi desenvolvido em dois ambientes de climas diferentes (semiárido e subtropical mediterrânico).

### **1.1. Objetivo Geral e Específicos**

O objetivo geral do estudo é a geração de um mapa de vulnerabilidade intrínseca como subsídio à implantação de uma rede de monitoramento a ser testada na APA Carste Lagoa Santa, Minas Gerais.

Os objetivos específicos do estudo de vulnerabilidade à contaminação aquífera na área da APA Carste Lagoa Santa, são:

- 1) Elaborar um modelo físico básico da geologia, da superfície freática, de dolinas e da vegetação representativa;



- 2) Aplicar o método de avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos cársticos – COP, gerando um mapa em escala 1:50.000 e,
- 3) Avaliar as potencialidades e limitações do método de vulnerabilidade aplicado.

## **1.2. Justificativa do Tema**

Em função de garantir a segurança hídrica para os diversos tipos de uso estudos preventivos são de fundamental importância e faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que permitam o diagnóstico e análise do ambiente para que seja possível conhecer os fatores de pressão sobre a água, em especial as áreas de risco que podem comprometer sua qualidade, tendo como objetivo principal contribuir para uma gestão racional dos recursos hídricos subterrâneos.

A localização da área selecionada, APA Carste de Lagoa Santa, situada no vetor norte da RMBH, justifica-se pela sua proximidade às zonas de intensa pressão antrópica, influenciada pelo grande número de empreendimentos de grande porte em infraestrutura como a Linha Verde, Aeroporto Internacional Tancredo Neves, Centro Administrativo do Estado de Minas Gerais e Anel Viário de Contorno Norte. Demais atividades como agropecuárias, minerárias e industriais também figuram dentre os fatores de pressão em expansão na área. Essas atividades podem ocasionar impactos nas zonas aquíferas, tendo em vista que a fragilidade do meio aquífero em contato com o ambiente antrópico, sem o devido estudo, pode resultar em catastróficas mudanças na disponibilidade hídrica, e se mal gerenciados, bombeamentos excessivos podem ocorrer resultando em um rebaixamento do lençol e consequente comprometimento do sistema de abastecimento, risco de subsidência do terreno e pequenos abalos sísmicos, podendo afetar diretamente à população.

Dentro dos limites compreendidos pela APA Carste Lagoa Santa, de uma forma geral, as maiores interferências econômicas são consequência da extração, principalmente, de calcário, da indústria do cimento e do Aeroporto de Confins.

De acordo com a ANA (2010), o total retirado de poços tubulares de todos os municípios que a APA carste intercepta equivale a 275,71 L/s, sendo esse tipo de captação responsável por 7% do abastecimento de Pedro Leopoldo e 100% dos municípios de Lagoa Santa, Funilândia, Prudente de Moraes, Matozinhos e Confins. Esses dados mostram a relevância da água subterrânea para a região.

Em termos político-gerenciais, uma importante iniciativa tomada em 2009 pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV, do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) foi a elaboração e implementação do Plano de Ação Nacional para Conservação do Patrimônio Espeleológico das Áreas Cársticas da Bacia do Rio São Francisco dentro do âmbito do Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico, conforme preconizado na Portaria MMA nº 358/2009 (MMA, 2009). No referido programa, foram

estabelecidos 14 (quatorze) objetivos específicos e 136 (cento e trinta e seis) ações a serem implementadas e concluídas até fevereiro de 2017.

Tendo em vista a conservação do ambiente cárstico da região do vetor norte em expansão, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) apresentou em 2013 um projeto ao ICMbio, ora sob execução pela UFMG, visando a implantação e operação de uma rede de monitoramento de água subterrânea na região da APA de Lagoa Santa. Assim, o resultado final deste estudo de vulnerabilidade, além de contribuir como instrumento de referência para o planejamento da ocupação territorial, embasará também a implementação dessa rede de monitoramento de água subterrânea pretendida pelo IGAM.

Projetos como “VIDA: Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental” (CPRM, 2003) e “APA carste de Lagoa Santa” (IBAMA, 1998), ambos conduzidos pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), além de trabalhos acadêmicos (ver Item 3.2 – Dados secundários), reúnem uma quantidade considerável de dados referentes à hidrogeologia da região, que possibilita uma avaliação estatisticamente mais consistente dos dados. Um dos produtos do projeto APA Carste de Lagoa Santa foi o “*Mapa de vulnerabilidade natural de aquíferos*”, na escala 1:50.000, cujos elementos considerados foram a permeabilidade e espessura das coberturas e as características das feições de absorção cársticas ou de recarga. O estudo estabeleceu a diferenciação dos domínios da área frente ao risco de contaminação, delimitando macrozonas de vulnerabilidade natural dos aquíferos. Contudo a vulnerabilidade intrínseca desse tipo de aquífero, de complexo funcionamento hídrico, demanda a inserção de outros parâmetros fundamentais, tais como a precipitação, taxas variadas de recarga, declividade do terreno, vegetação, grau de carstificação e profundidade do nível d’água, conforme proposto.

Assim, o método vulnerabilidade intrínseca selecionado, COP, específico para aquífero cárstico, justifica-se por resultar em um maior número de níveis de vulnerabilidade, e menor grau de subjetividade dos parâmetros de entrada, em relação aos métodos PI e EPIK descritos no item 2.2.2 (Métodos com ferramentas específicas para avaliação da vulnerabilidade em aquíferos cársticos), conforme análise dos resultados obtidos por Vías *et al.* (2002) que comparou os elementos de análise metodológicos aplicados na metodologia COP com os de outros métodos específicos para aquíferos cársticos.

Uma vez elaborado o mapa final de vulnerabilidade intrínseca do sistema aquífero, o estudo consistirá de uma fonte de orientação para o ordenamento de ocupação territorial aos órgãos gestores municipais existentes na APA Carste Lagoa Santa, comitês de bacia, órgãos estaduais do meio ambiente, bem como ao órgão de gestão das águas (IGAM), pois a garantia da qualidade da água

subterrânea nesse frágil sistema hidrogeológico pressupõe o estabelecimento de normas de ocupação compatíveis com o zoneamento da vulnerabilidade intrínseca à contaminação dos aquíferos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

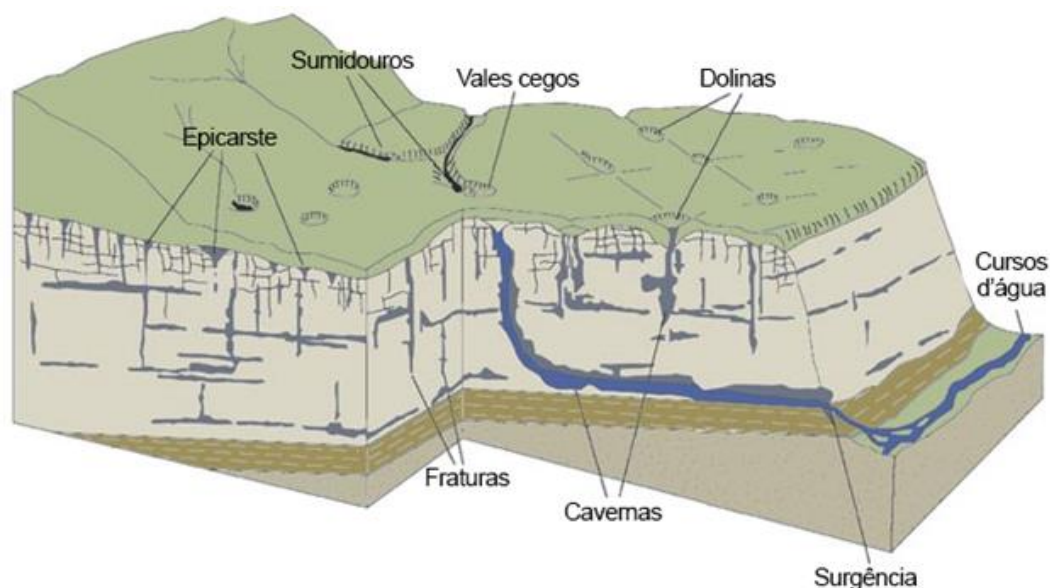
### 2.1. Sistemas Aquíferos Cársticos

#### 2.1.1. Principais Características

Zonas desenvolvidas a partir de rochas solúveis pela água (dolomito, calcário, gipso, halita etc.) estão entre os relevos mais fascinantes, emblemáticos, diversos e abundantes em recursos do planeta. Um ambiente que abriga animais raros em um habitat subsuperficial frágil e único. É berço de grandes descobertas paleontológicas e reduto de sítios arqueológicos.

Grandes paredões lineares, uma vasta sucessão de depressões fechadas, cânions, cavernas e grutas, vales cegos, drenagem superficial pobre aliada a um sistema de drenagem subterrânea bem desenvolvido, e forte relação entre a circulação das águas superficiais e subterrâneas, tipificam o carste (Hollingsworth, 2009). Christofolletti (1980), define carste como áreas calcárias ou dolomíticas com uma topografia característica, oriunda da dissolução de tais rochas. A Figura 1 indica as principais feições de um carste teórico bem desenvolvido (Goldscheider, 2005).

Figura 1: Principais feições encontradas em um ambiente cárstico desenvolvido

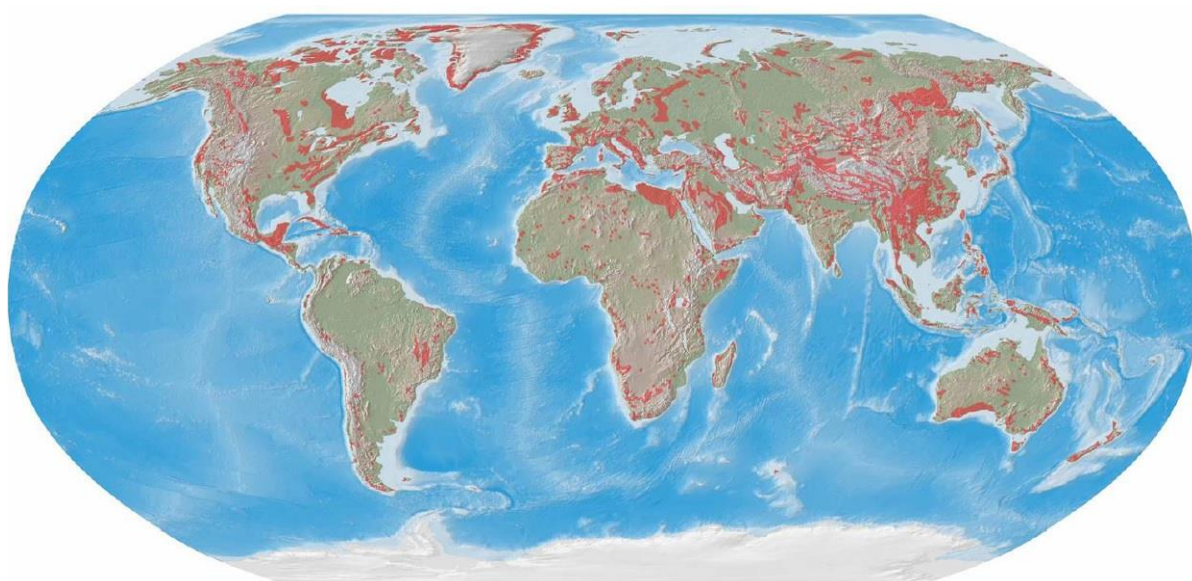


.Fonte: Goldscheider (2005).

O estudo deste tipo de relevo iniciou-se com as observações dos antigos filósofos gregos e romanos, formalizadas cientificamente na região do Planalto de *Kras*, na Eslovênia (Travassos, 2010). Através de observações sistemáticas ao longo dos anos uma melhor compreensão dos processos que originavam esse tipo de paisagem foi construída e, segundo *Sweeting* (1972) e *Ford et al.* (2007), o termo *karst* foi introduzido em estudos científicos e internacionalizado através da obra *Das Karstphänomen* (1893), do geógrafo sérvio Jovan Cvijić (1865-1927) (Cvijić, 1893). No Brasil, a palavra evoluiu para o termo carste.

Configurações cársticas recobrem de 12 a 25% da superfície terrestre – Figura 2 (White, 1988; Veni *et al.* 2001; Ford *et al.* 2007) e estão associadas a algumas das maiores nascentes e os mais produtivos aquíferos da Terra. Populações inteiras podem ser abastecidas por mananciais cársticos, como por exemplo, o Aquífero *Floridan*, situado no estado da Flórida (EUA), produz 39.479,17 m<sup>3</sup>/h via poços tubulares, e, a nascente *Figed* (Síria), terceira maior nascente do mundo, com descarga média de 14.400 m<sup>3</sup>/h, abastece toda a capital Damasco (Veni *et al.* 2001). No Brasil, aquíferos associados ao grupo Bambuí podem fornecer vazões por poço de até 200 m<sup>3</sup>/h e na região de Sete Lagoas-Lagoa Santa são encontradas vazões superiores a 150 m<sup>3</sup>/h (MME, 2009).

Figura 2: Distribuição das grandes bacias de rochas carbonáticas no mundo (em vermelho).



Fonte: Modificado de Sweeting (1972) e Ford et al. (2007). Retirado de Hollingsworth (2009).

### 2.1.2. Processos Químicos e Físicos de Formação

As rochas carbonáticas são formadas por processos químicos, bioquímicos e aloquímicos que contemplam as etapas de deposição e decomposição de organismos ricos em cálcio, como algas, conchas, corais e moluscos. Apresentam como componentes mineralógicos essenciais a Calcita ( $CaCO_3$ ), a Dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ), a Siderita ( $FeCO_3$ ) e a Magnesita ( $MgCO_3$ ), entre outras, ocorrendo em diferentes proporções. Os seus depósitos podem variar de extensas e espessas camadas até lentes de extensões métricas a quilométricas, encaixadas em formações sedimentares e metamórficas. Apresentam grande significado estratégico e econômico por serem importantes reservatórios de água e petróleo (Souza, et al., 2005).

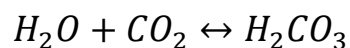
Apesar de apresentar aquíferos bastante produtivos, esse tipo de relevo de formas geomorfológicas e hidrologia distintas também é muito vulnerável a impactos decorrentes da atividade humana, já que as águas subterrâneas e águas de superfície têm uma alta conexão hidráulica

através de numerosas feições cársticas resultantes da evolução de rochas com alta solubilidade e porosidade secundária bem desenvolvida (Ford *et al.* 1989).

Nos terrenos cársticos as águas superficiais e subterrâneas constituem um sistema dinâmico único (Kohler, 1989) que é condicionado, mais do que qualquer outro tipo de relevo, por processos hidrogeológicos de dissolução dos principais minerais formadores dos calcários, predominantemente carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) e dolomitos ( $CaMg(CO_3)_2$ ), onde a água naturalmente enriquecida em dióxido de carbono ( $CO_2$ ) atmosférico forma ácido carbônico ( $H_2CO_3$ ), e possibilita que o desequilíbrio da solução resulte no desenvolvimento do sistema por dissolução.

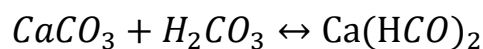
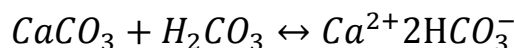
O ácido carbônico dissocia-se rapidamente formando íon bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) e íon hidrogênio ( $H^+$ ), se houver disponibilidade suficiente de reagente, a reação continua e o íon bicarbonato dissocia-se formando íon carbonato ( $CO_3^{2-}$ ) e íon hidrogênio ( $H^+$ ) (Amâncio, 2007).

A percolação de águas ricas em  $H_2CO_3$  e a liberação de íons de hidrogênio levam a uma acidificação do meio (queda do pH), também frequentemente diminuído pela presença de ácidos fúlvicos e/ou húmicos produzidos por processos biológicos de degradação de materiais vegetais dos solos (Suguió, 2003). Um ambiente mais ácido acelera o processo de dissolução do calcário, em uma reação reversível dependente da quantidade de água e dióxido de carbono disponíveis. Os principais elementos responsáveis pela manutenção da reação de dissolução são demonstrados a seguir:



Água + gás carbônico  $\rightarrow$  Ácido carbônico

A reação entre as partículas de água e o gás carbônico atmosférico gera o ácido carbônico. O ácido carbônico também se apresenta dissociado em seus íons constituintes. Quando em contato com o carbonato de cálcio, que constitui o calcário, o ácido carbônico reage de acordo com a fórmula:



Carbonato de cálcio + Ácido Carbônico  $\rightarrow$  Bicarbonato de cálcio

O bicarbonato de cálcio é solúvel na água e pode ser facilmente carregado para fora do sistema, causando a dissolução da rocha. Ambas as reações são reversíveis e, eventualmente, o sistema entra em equilíbrio (Jennings, 1985).

Para Kohler (1989), o volume da água, o clima, o teor de carbonato de cálcio da rocha, e sua estrutura de acamamento e fraturamento, constituem as principais variáveis que contribuem para a corrosão do relevo sobre as rochas carbonáticas e favorecimento dos processos morfogenéticos responsáveis pela dinâmica e evolução do relevo. A velocidade cinética das reações de dissolução é condicionada principalmente pela concentração de íons  $H^+$  e de  $CO_2$ , e pela temperatura. Em geral, estes fatores explicam os distintos padrões das feições originadas no carste de diferentes zonas

climáticas (Guareschi, 2012). Por exemplo, as diferenças dos fenômenos do carste da região de Irecê, na Bahia, onde o índice pluviométrico é baixo restringindo a circulação hídrica e conseqüentemente a dissolução das rochas, com o da Região da APA Carste de Lagoa Santa, em Minas Gerais. Como se sabe, apesar desses dois sistemas cársticos serem formados por rochas do grupo Bambuí, com mesma idade e composição químicas, neste último a carstificação é muito mais intensa (Feitosa *et al.* 2008).

A temperatura é o fator físico controlador da solubilidade do  $CO_2$ , sendo que a quantidade de  $CO_2$  está na razão inversa da temperatura (Lladó, 1970). Entretanto, em certos ambientes, para compensar a diminuição do  $CO_2$  na água pelo aumento da temperatura, a solubilidade do bicarbonato de cálcio aumenta (também pelo fator temperatura). Portanto, os fenômenos de dissolução e desenvolvimento do processo de carstificação nos climas quentes são tão ativos quanto nos climas frios (Silva, 2001).

Além do carste convencional, carbonático, existem também configurações de ambientes que se assemelham ao carste, entretanto não se desenvolvem em rochas carbonáticas, podendo evoluir a partir de outras formações como arenitos, quartzitos, gipsitas, anidritas, halitas, dentre outros. Essas formas são classificadas como “Pseudo carste”. O ambiente de subsuperfície nestas áreas é semelhante em muitos aspectos ao carste convencional, mas por terem sido formados por processos diferenciados, apresentam fluxo de água subterrânea, qualidade da água e os processos ambientais normalmente distintos (Hollingsworth, 2009).

A diferença entre os materiais formadores das rochas que formam o carste e o pseudo carste se dá também na solubilidade de cada mineral, fazendo com que cada tipo de rocha tenha uma reação e evolua de uma maneira singular. A Tabela 1 expressa a solubilidade de diferentes minerais em pH, temperatura e pressão constantes.

Tabela 1: Reações de dissociação e solubilidade de alguns minerais representativos que dissolvem congruentemente em água, aos 25°C e 1 bar (105 Pa) de pressão.

Mineral	Reação de dissociação	Solubilidade em pH 7 (mg/l)	Faixa de abundância em águas meteóricas (mg/l)
Gibbsita	$Al_2O_3 \cdot 2H_2O + H_2O = 2Al^{3+} + 6OH^-$	0,001	Traços
Quartzo	$SiO_2 + 2H_2O = Si(OH)_4$	12	1-12
Sílica amorfa	$SiO_2 + 2H_2O = Si(OH)_4$	120	1-65
Calcita	$CaCO_3 = Ca^{2+} + CO_3^{2-}$	100*, 500*	10-300

Dolomita	$CaMg(CO_3)_2 = Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2CO_3^{2-}$	90*, 480*	10-300 (como $CaCO_3$ )
Gipsita	$CaSO_4 \cdot 2H_2O = Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$	2.400	0-1.500
Silvita	$KCl = K^+Cl^-$	264.000	0-10.000
Mirabilita	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O = 2Na^+SO_4^{2-} + 10H_2O$	280.000	5-10.000
Halita	$NaCl = Na^+Cl^-$	360.000	5-10.000

Fonte: Modificado de Ford *et al.* (1989).

### 2.1.3. Dinâmica de Recarga e Fluxo Subterrâneo

Entre os principais tipos de aquíferos, os aquíferos cársticos são considerados os sistemas mais complexos e difíceis de decifrar. As velocidades de fluxo desses sistemas são tipicamente maiores do que em outros sistemas, como o poroso, sendo também muito anisotrópicos e heterogêneos. As águas de suas nascentes podem apresentar flutuações dramaticamente rápidas em resposta a eventos superficiais. A natureza altamente heterogênea de aquíferos cársticos conduz a uma dificuldade em prever a direção preferencial do fluxo de águas subterrâneas e os tempos de viagem por métodos convencionais podendo-se utilizar como alternativa estudos isotópicos e traçadores radioativos ou naturais.

A imprevisibilidade do comportamento dos fluxos levou a discussão de um modelo de “tripla permeabilidade” (White, 2003), que consiste em: permeabilidade da matriz, permeabilidade das fraturas e permeabilidade dos condutos. O fluxo de água atravessa cada uma dessas camadas de diferentes maneiras e em escalas diferentes. O grau de carstificação de um aquífero é em grande parte medido pela distribuição da sua permeabilidade (White, 1988). Portanto, os aquíferos cársticos podem ser descritos como uma rede de condutos que interagem com fraturas e uma matriz de rocha menos carstificada (Goldscheider, 2005).

O fluxo nos condutos, que podem variar de largura centimétrica de fraturas de dissolução a grandes passagens de cavernas, é rápido (muitas vezes > 100 m/h), e, muitas vezes turbulento, enquanto as velocidades de fluxo na matriz são muito mais baixas.

Segundo Duarte *et al.* (2013), aquíferos cársticos podem ser divididos em quatro grandes zonas, sendo elas:

- Zona de absorção ou de recarga

Inclui o solo e relevo que constitui o epicarste. A água entra de forma difusa ou concentrada no aquífero e uma parte pode ser armazenada temporariamente. Há pontos de recarga direta por



sumidouros e diferentes tipos de depressões como as dolinas, uvalas e Poljés, onde a recarga se concentra.

- Zona de circulação vadosa não saturada ou de transferência vertical:

Se conecta com a zona freática por meio de redes de fissuras verticais e dutos.

- Zona de flutuação ou epifreática:

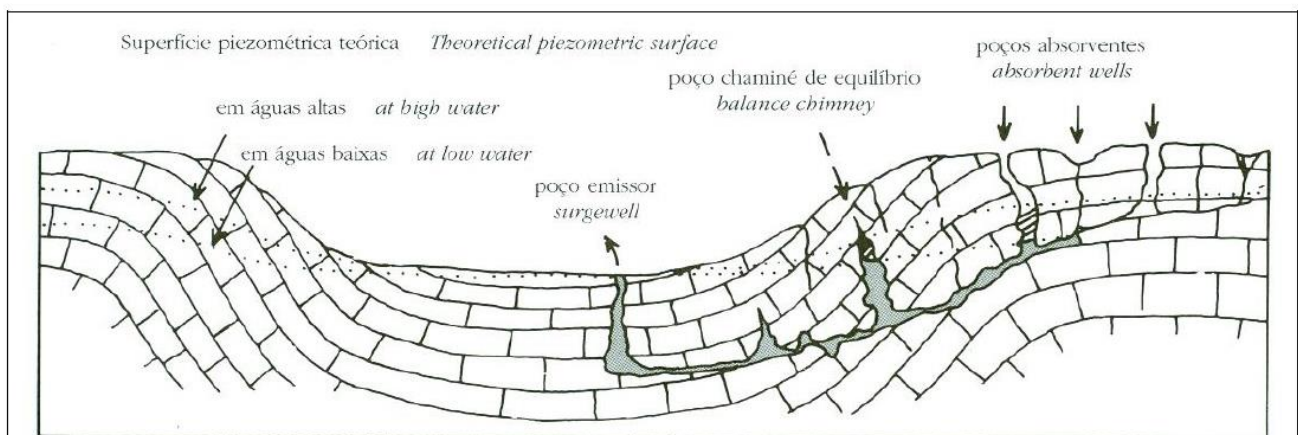
Localizada entre a zona insaturada e saturada, apresenta um funcionamento misto, por vezes, está saturada com água, outras vezes não.

- Zona freática ou saturada:

É uma rede de condutos com elevada permeabilidade e capacidade de armazenamento totalmente saturada.

A Figura 3, representa o funcionamento teórico de circulação de águas em um aquífero cárstico conforme Lino (2001), com a indicação das zonas do aquífero mencionadas por Duarte, *et al.* (2013).

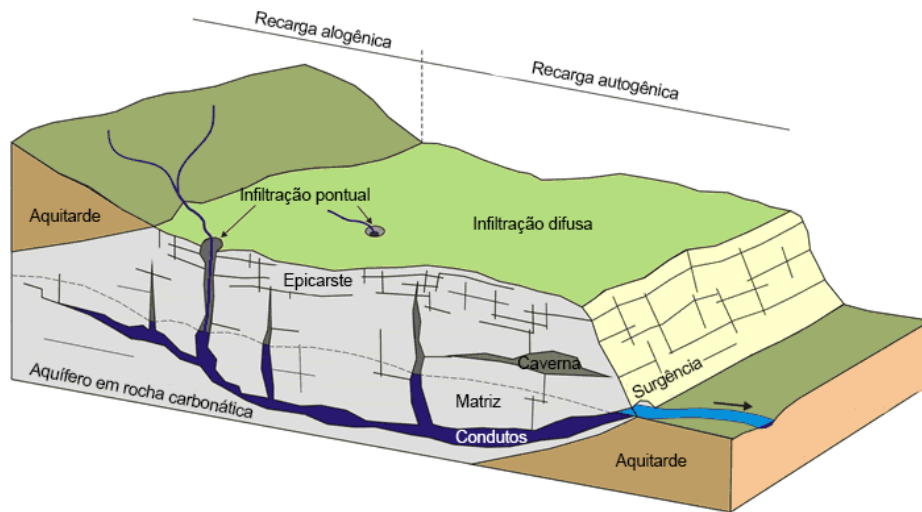
Figura 3: Padrão de circulação das águas em área cárstica.



Fonte: Lino (2001).

A recarga em aquíferos cársticos pode originar-se de zonas de absorção a partir do próprio sistema (autógeno) ou a partir de áreas não-cársticas adjacentes (alogênico), ilustrado na Figura 4. A água pode infiltrar-se em sumidouros ou dolinas, que são os pontos de recarga, ou difusamente em fissuras na rocha e a partir de solos subjacentes (Goldscheider, 2005).

Figura 4: Recargas alogênica e autogênica em ambiente cárstico.



Fonte: Goldscheider *et al.* (2007).

A infiltração difusa ocorre com a percolação da precipitação na superfície do solo e pode ficar estocada por semanas ou meses no epicarste antes de migrar descendentemente pela matriz da rocha ou fraturas e atingir o nível superior do aquífero (White, 2003).

Na recarga alogênica, as águas superficiais geradas fora da região cárstica e drenadas sobre o próprio terreno cárstico, muitas vezes se infiltram através de múltiplos sumidouros, onde bacias inteiras são conectadas ao aquífero (White, 2003), enquanto a recarga autogênica, proveniente apenas da precipitação sobre a bacia cárstica, é muitas vezes difusa, embora a concentração de fluxo no epicarste possa canalizar a água infiltrada em direção a dolinas, sumidouros e condutos (Goldscheider, 2005).

Outros tipos de aquífero, particularmente aquíferos granulares, recebem principalmente recarga autógena e difusa, enquanto a dualidade descrita é específica para o carste (Goldscheider, 2005).

## 2.2. Mapeamento e Avaliação da Vulnerabilidade

O termo vulnerabilidade foi inicialmente introduzido no meio técnico-científico por Le Grand, em 1964 nos EUA, Margat (1968) e Albinet *et al.* (1970), na França, e Taltasse (1972), no Brasil, como susceptibilidade intrínseca do meio aquífero em ser adversamente afetado por uma carga contaminante antrópica (Feitosa *et al.* 2008). Em uma visão mais moderna o conceito de vulnerabilidade é baseado na suposição de que o ambiente físico fornece alguma proteção natural para as águas subterrâneas contra impactos humanos (Vrba *et al.* 1994). Entretanto, existe uma grande variedade de definições para a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas (Tabela 2). Segundo Auge (2004), a maioria delas se refere a propriedades intrínsecas do solo, subsolo e do aquífero de servirem como proteção natural para as águas subterrâneas. Salienta-se que todos esses

conceitos partem do princípio fundamental, indicado em NRC (1993) como a primeira Lei da vulnerabilidade de águas subterrâneas, de que toda a água subterrânea é vulnerável.

Tabela 2: Algumas definições utilizadas para a vulnerabilidade de aquíferos ao longo do tempo.

Conceito	Definição	Autor
Vulnerabilidade	Proteção natural que os estratos terrestres exercem para atenuar a entrada de contaminantes nos aquíferos	Albinet e Margat (1970)
Vulnerabilidade	Características intrínsecas que determinam a sensibilidade de um aquífero a uma carga poluente.	Foster (1987)
Vulnerabilidade	A tendência ou a probabilidade de que os contaminantes alcancem uma posição específica no sistema de águas subterrâneas.	NRC (1993)
Vulnerabilidade intrínseca	Susceptibilidade natural do meio biofísico e do meio ambiente hidrogeológico à contaminação, sem considerar um contaminante particular.	Vrba e Zaporozec (1994); Daly <i>et al.</i> (2002)
Vulnerabilidade específica	Considera o impacto de um determinado poluente ou uso da terra.	Vrba e Zaporozec (1994); Daly <i>et al.</i> (2002)
Vulnerabilidade	Características naturais (hidrologia, solos, topografia, clima e vegetação) inerentes ao sistema como um todo para determinar a suscetibilidade à contaminação por atividades humanas. Isto reflete-se no potencial de perda da qualidade das águas subterrâneas. Esta definição é limitada às características intrínsecas de uma área (mecanismos e processos de atenuação natural de fluxo).	Zwahlen (2003)

Fonte: Modificado de Duarte et al. (2013).

Como exposto na Tabela 2 o conceito de vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação tem significados diferentes para autores distintos ao longo do tempo. Em seu contexto mais amplo, a vulnerabilidade de águas subterrâneas refere-se à possibilidade ou não de um aquífero subjacente sofrer contaminação como resultado de atividades na superfície da terra (NRC, 1993).

A vulnerabilidade não pode ser tratada como intransmutável, mas relativa, já que resulta de variáveis que estão em constante transformação indicando locais onde possa ocorrer uma maior probabilidade de contaminação. Portanto, os índices finais de vulnerabilidade também oscilam de acordo com a alteração do meio. Além disso, pode ser necessário considerar efeitos a longo prazo sobre a qualidade da água subterrânea, talvez ao longo de décadas, na realização de avaliações de vulnerabilidade (NRC, 1993).

A vulnerabilidade pode ser classificada como: intrínseca e específica. A vulnerabilidade intrínseca é definida como uma função das propriedades geológicas, hidrogeológicas e hidrológicas de um sistema e independente das propriedades de um contaminante específico. A vulnerabilidade específica considera as propriedades de um contaminante em particular, ou de um grupo de contaminantes, em adição à vulnerabilidade intrínseca da área (Zwahlen, 2003).

De acordo com Maia *et al.* (2003), pesquisas envolvendo a vulnerabilidade ambiental vêm sendo desenvolvidas com uso de Sistema de Informações Geográficas –SIG, que é definido por Teixeira (1995) e Teixeira *et al.* (1997) como o conjunto de sistemas computacionais (hardware e software), metodologias, dados e recursos humanos que operam de forma a tornar possível a produção e análise de informações georreferenciadas. Meneses (2003) destaca a facilitação que o emprego de ferramentas computacionais propicia ao executar análises complexas com a interação de dados de fontes diversas e a criação de banco de dados georreferenciados.

Segue a exposição de alguns dos métodos mais utilizados em se tratando de vulnerabilidade intrínseca por todo o mundo, porém será dada uma atenção especial aos métodos que tangem os aquíferos cársticos.

### **2.2.1. Métodos para a Avaliação da Vulnerabilidade**

Uma série de abordagens para a determinação da vulnerabilidade de aquíferos foram elaboradas a partir de uma compreensão dos fatores que afetam o transporte de contaminantes introduzidos na ou perto da superfície da terra. Os resultados dessas análises são utilizados como ferramenta de gestão dos recursos hídricos no auxílio às propostas de proteção das águas subterrâneas e ordenamento territorial. Os principais métodos empregados para a qualificação e mapeamento da vulnerabilidade foram desenvolvidos especialmente para aquíferos granulares livres, porém existem métodos específicos para aquíferos cársticos e fraturados. Segundo Vrba & Zaporozec (1994) e NRC (1993), as metodologias podem ser classificadas em três grupos principais, de acordo com a abordagem adotada:

- Sistemas paramétricos: utilizam-se de parâmetros selecionados como indicadores de vulnerabilidade em sobreposição a mapas que combinam características físicas específicas que afetam a vulnerabilidade, muitas vezes dando uma pontuação numérica para produzir alguma forma de índice de vulnerabilidade relativo ou absoluto. Incluem como exemplos o método DRASTIC de Aller & Bennet (1987); o método SINTACS (Civita *et al.* 1997); além da metodologia GOD (Foster, 1987; Foster *et al.* 1988). Outro método digno de nota nessa categoria é o EPIK, desenvolvido especificamente para aquíferos cársticos e discutido por Doerfliger & Zwahlen (1997), assim como o método COP (Vías *et al.* 2002; Vías *et al.* 2006) que foi aplicado no presente trabalho;

- Modelos análogos: métodos baseados em modelos matemáticos que aproximam o comportamento das substâncias em subsuperfície, utilizam expressões matemáticas para os parâmetros essenciais, tais como tempo de trânsito médio na zona vadosa como indicadores do índice de vulnerabilidade;

- Métodos estatísticos: desenvolvem-se a partir de associações estatísticas de áreas onde a contaminação é conhecida por ter ocorrido. Estes métodos incluem dados sobre distribuições de contaminantes conhecidos e fornece caracterizações do potencial de contaminação para zonas geográficas específicas, a partir das quais foram extraídos os dados.

Dentre os sistemas paramétricos existem vários métodos para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca que podem ser aplicados levando em consideração a tipologia do aquífero. Os métodos mais utilizados para aplicação em qualquer tipo de aquífero são: AVI (Von Stempvoort *et al.* 1992), DRASTIC (Aller *et al.* 1987), SINTACS (Civita *et al.* 1997), e GOD (Foster, 1987) (Foster *et al.* 1988).

Von Stempvoort *et al.* (1993) propuseram o método AVI, *Aquifer Vulnerability Index* (Índice de Vulnerabilidade de Aquífero), cujo princípio é baseado em dois fatores: espessura de cada camada litológica sedimentar acima da zona saturada e condutividade hidráulica estimada de cada uma destas camadas. A partir desses fatores, obtêm-se o fator C (resistência hidráulica), que descreve a resistência de um aquífero a um fluxo vertical e esses valores podem ser usados diretamente para gerar mapas de vulnerabilidade (Queluz *et al.* 2011), .

O modelo DRASTIC foi desenvolvido por Aller *et al.* (1987) por intermédio da Agência de Proteção Ambiental estadunidense (EPA – *Environmental Protection Agency*). Este método considera a soma ponderada de sete valores relacionados a fatores hidrogeológicos: Profundidade da zona não-saturada do solo (D); Recarga do aquífero (R); Material do aquífero (A); Tipo de solo (S); Topografia ou declividade do terreno (T); Influência da zona não saturada (I) e, condutividade hidráulica (C). O elevado número de variáveis consideradas gera uma grande quantidade de dados de entrada, o que pode se tornar um inconveniente quando o acesso a essas informações é limitado.

O SINTACS pode ser considerado uma derivação do método DRASTIC, defendido por Civita *et al.* (1997) para regiões italianas, com a finalidade de desenvolver mapas de vulnerabilidade com maior nível de detalhamento. Utiliza os seguintes parâmetros para o mapeamento das áreas mais vulneráveis: Profundidade da água (S); Infiltração (I); Seção subsaturada (N); Tipo de cobertura de solo (T); Características hidrogeológicas do aquífero (A); Condutividade hidráulica (C) e, declividade topográfica (S). Pode apresentar as mesmas complicações do método DRASTIC pelo grande número de parâmetros considerados.

O índice GOD desenvolvido por Foster (1987) e adaptado por Foster & Hirata (1988), considera três fatores para a determinação da vulnerabilidade das águas subterrâneas: Confinamento do aquífero (G); Litologia e o grau de consolidação da cobertura (O), e Profundidade da superfície freática (D). O índice final é obtido a partir do produto entre esses três fatores. É importante destacar que essa foi umas das técnicas mais utilizadas na América Latina durante os anos 90, por sua simplicidade de conceitos e aplicação (Feitosa *et al.* 2008).

Entretanto, aquíferos cársticos apresentam características especiais e a utilização desses métodos pode levar a uma modelagem da vulnerabilidade inadequada. Para suprir as lacunas das especificidades encontradas nos ambientes cársticos, métodos como COP (Vías *et al.* 2002; Vías *et al.* 2006), EPIK (Doerfliger *et al.* 1997; Doerfliger *et al.* 1999) e PI (Goldscheider *et al.* 2000), foram criados e adaptados.

### **2.2.2. Métodos com Ferramentas Específicas para Avaliação da Vulnerabilidade em Aquíferos Cársticos**

A capacidade de regiões cársticas em armazenarem água e a alta propensão à contaminação destes aquíferos têm motivado a elaboração de programas e ações de controle em várias partes do mundo. Dentre os propostos, merece destaque a ação nº 620 determinada pela *European Cooperation in Science and Technology* – COST (2004), esta iniciativa baseou-se na produção de ferramentas capazes de auxiliar no gerenciamento específico das áreas cársticas levando em consideração, principalmente, a questão hídrica, buscando propor alternativas coerentes para conservação do carste.

O conceito de vulnerabilidade das águas subterrâneas é aplicável para todos os tipos de aquíferos - granular, fraturado e cárstico. No entanto, devido às propriedades especiais do carste, é essencial o desenvolvimento de conceitos que levem em conta a natureza única desse ambiente (Zwahlen, 2003).

Para a aplicação específica em aquíferos cársticos três métodos mais populares serão descritos, são eles: EPIK, PI e COP, sendo que o último será tratado de forma detalhada em um tópico separado.

#### **2.2.2.1. EPIK**

Proposto por Doerfliger *et al.* (1995) e Doerfliger (1996), o método EPIK, aplicado inicialmente na Suíça dentro da zona de influência de nascentes utilizadas no abastecimento público de água do município de St-Imier, foi o primeiro método para o mapeamento da vulnerabilidade de uma unidade cárstica (Nossa, 2011) desenvolvido apenas para utilização nesse tipo de ambiente (Doerfliger *et al.* 1997; Doerfliger *et al.* 1999). Baseado em fatores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos específicos é avaliado através de quatro parâmetros considerados para o índice de

vulnerabilidade intrínseca: Epicarste (E), Camadas de proteção (P), Condições de infiltração (I) e Desenvolvimento do sistema cárstico (K).

Para cada um dos parâmetros são atribuídos coeficientes de ponderação padrão que refletem o grau de proteção relativa para a proteção de aquíferos cársticos segundo os grupos pré-determinados em Doerfliger (1996). A classificação para cada parâmetro é obtida por mapeamento sistemático destes parâmetros. Experiências práticas destacam E (Epicarste) e I (Condições de Infiltração) como parâmetros prevalentes na avaliação EPIK (Zwahlen, 2003).

O parâmetro Epicarste (E) considera uma zona de intensa carstificação e com elevada permeabilidade da superfície e subsuperfície (Tripet *et al.* 1997). É indiretamente baseado em feições geomorfológicas típicas que podem ser facilmente mapeadas (Doerfliger *et al.* 1997). Três valores podem ser utilizados dependendo da caracterização da área (Tabela 3):  $E_1$  corresponde a uma rede cárstica típica, com dolinas, cavidades, grutas, etc.;  $E_2$  para superfícies frágeis na zona superficial que geram alinhamentos, como vales secos; e,  $E_3$  caracterizado pela ausência de morfologia cárstica (Nossa, 2011).

Tabela 3: Classificação das classes do subfator Epicarste (E).

	<b>Epicarste</b>	<b>Valor</b>	<b>Feições de morfologia cársticas</b>
$E_1$	Altamente desenvolvido	1	Sumidouros, dolinas, lapiez, afloramentos com alto índice de fraturamento
$E_2$	Moderadamente desenvolvido	3	Zonas intermediarias nos alinhamentos de dolinas, vales cegos e afloramentos com médio índice de fraturamento.
$E_3$	Pouco desenvolvido ou ausente	4	Sem morfologia cárstica identificável, Baixa densidade de fraturamento

Fonte: Doerfliger et al. (1998)

O parâmetro P (Camadas de Proteção) descreve a função de proteção das camadas entre a superfície do solo e do lençol freático, principalmente da distribuição da profundidade do solo, subsolo, rochas não cársticas e cársticas não saturadas (Polemio *et al.* 2009). Estes parâmetros estão relacionados com as propriedades físicas, químicas e biológicas que permitem a atenuação natural.

A espessura de um solo é fortemente relacionada ao tempo de residência da água até o contato com o aquífero, sendo uma propriedade importante ao avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, já que apresenta significativa influência na atenuação de contaminantes (Zaporozec, 1985). Quanto menor a espessura o solo, maior é a vulnerabilidade associada (Polemio *et al.* 2009).

Os valores desses parâmetros são condicionados por duas situações: i) solos ou detritos de alta permeabilidade diretamente sobre o calcário; ii) solos sobre camadas geológicas de baixa

permeabilidade. Em cada uma das situações quanto maior for a espessura do solo e das camadas subjacentes (e sua permeabilidade) maiores serão os valores de proteção associados (Tabela 4). É recomendada a verificação de campo, utilizando, por exemplo, perfil de poços ou tradagens para sondagem de solo, assim como a consulta de mapas topográficos, geológicos, de solos e estudos geológicos e regionais para definir as áreas da captação de água com ou sem sobreposição de camadas geológicas (Doerfliger *et al.* 1999).

Tabela 4: Classificação dos atributos do subfator Camada de Proteção (P)

Camada de proteção	Valor	Caracterização	
		A. Solo diretamente acima de calcário ou sedimentos de alta permeabilidade	B. Solo sobre litologias de baixa permeabilidade
$P_1$	1	0-20 cm de solo	0-20 cm de solo sobre camadas com espessura de menos de 1 metro.
$P_2$	2	20-100 cm de solo	20-100 cm de solo sobre camadas com espessura de menos de 1 metro.
$P_3$	3	100-200 cm de solo	Menos 100 cm de solo ou mais de 100 cm de solo e mais de 100 cm de camada com baixa permeabilidade
$P_4$	4	>200 cm de solo	Mais de 100 cm de solo e espessa camada de detritos com baixa condutividade hidráulica ou mais de 8 m de argila ou material argilosilto

Fonte: Doerfliger et al. (1998).

O parâmetro I (condições de infiltração) é avaliado pela identificação de zonas de infiltração concentrada e áreas em que a infiltração difusa prevalece. Posteriormente, é caracterizado pelo seu coeficiente de escoamento, o qual depende da declividade e do uso do solo (Polemio *et al.* 2009; Doerfliger *et al.* 1999).

Os valores diferem, dependendo da declividade e do padrão de uso da terra na bacia hidrográfica, para as áreas dentro e fora da área de influência de sumidouros e drenagens associadas (Tabela 5).



Tabela 5: Valores dos atributos do subfator I e caracterização das condições de infiltração.

Condições de Infiltração	Valor	Caracterização
$I_1$	1	Sumidouro perene ou temporário/ Curso d'água perene ou intermitente que tenha a descarga em dolinas ou sumidouros. Áreas da bacia que contém drenagem artificial.
$I_2$	2	Áreas sem sistemas de drenagem artificial e onde a declividade é maior do que 10% para áreas cultivadas e maior do que 25% em campos e pastos.
$I_3$	3	Áreas sem sistemas de drenagem artificial e onde a declividade é menor do que 10% para áreas cultivadas e menor do que 25% em campos e pastos.
$I_4$	4	Restante da área de drenagem.

Fonte: Doerfliger et al. (1998).

Os dados necessários para a caracterização das condições de infiltração são obtidos através de estudos da captação de água de superfície por sumidouros e suas drenagens usando mapas topográficos, observações de campo e investigações anteriores (Doerfliger *et al.* 1998).

Finalmente, o parâmetro K representa o grau de desenvolvimento da rede cárstica no aquífero. É definido pelo sistema subterrâneo que compreende aberturas de mais de 10 mm de diâmetro, que é o valor mínimo para que o fluxo turbulento seja agravado (BÖGLI, 1980, citado por Doerfliger *et al.* 1999). Sumidouros e sistemas de cavernas ativos, e inativos, são considerados indicadores da rede cárstica. O desenvolvimento da rede cárstica e seu grau de organização tem um efeito importante sobre o fluxo e velocidade da água e, portanto, sobre a vulnerabilidade (Zwahlen, 2003).

A vulnerabilidade pelo parâmetro K (Desenvolvimento da rede cárstica) é avaliada em termos da presença ou ausência de uma rede cárstica e seu grau de desenvolvimento. A fim de determinar a importância da rede em relação as rochas circundantes com menor permeabilidade (fissuradas ou maciças) três diferentes indicadores são considerados (Tabela 6): hidrogramas de fluxo, mapeamento da dimensão e localização de sistemas de cavernas e sumidouros, que permitem a interpretação do grau de desenvolvimento, e da estrutura do aquífero cárstico (Doerfliger *et al.* 1998).

Tabela 6: Valores das classes e caracterização do desenvolvimento da rede cárstica.

	Rede Cárstica	Valor	Caracterização
$K_1$	Rede Cárstica desenvolvida	1	Presença de uma rede de carstificação bem desenvolvida (rede com canais de tamanhos variando entre decímetros até metros bem conectados).
$K_2$	Rede Cárstica mal desenvolvida	2	Presença de uma rede de carstificação pouco desenvolvida (rede de pequenos dutos, ou pouco conectados, ou redes de aberturas dessimétricas ou menores).
$K_3$	Aquífero fissurado ou misto	3	Presença de nascente emergindo através de terrenos porosos. Aquíferos não cársticos, somente fissurados.

Fonte: Doerfliger et al. (1998).

Para o cálculo do índice de vulnerabilidade, ou fator final de proteção (Fp), pelo método EPIK, são aplicados fatores de ponderação aos valores obtidos em cada um dos parâmetros analisados anteriormente. A avaliação é feita multiplicando os valores de cada classe por um coeficiente de ponderação ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ), específico para a função de proteção de cada parâmetro. Doravante, o fator final de proteção pode ser alcançado segundo a fórmula (Doerfliger *et al.* 1999):

$$Fp = (\alpha \times E_i) + (\beta \times P_j) + (\gamma \times I_k) + (\delta \times K_w)$$

$$\text{Onde, } \alpha=3; \beta=1; \gamma=3; \delta=2.$$

O valor mínimo possível do fator de proteção (Fp) é 9; enquanto o máximo é 34. O índice de vulnerabilidade se comporta inversamente ao fator de proteção e pode ser classificado em quatro classes (baixo, moderado, alto e muito alto). Os menores valores de proteção correspondem a vulnerabilidades mais elevadas, ao passo que, quanto maior o resultado do Fp, menor o valor da vulnerabilidade na área foco.

#### 2.2.2.2. PI

O método PI foi aplicado pela primeira vez no município de Engen, Alemanha, por Goldscheider *et al.* (2000), e posteriormente testado por vários grupos de investigação europeus em outros locais. A ação europeia COST 620 propõe este método como uma possibilidade de mapeamento da vulnerabilidade intrínseca dos recursos hídricos subterrâneos em ambientes cársticos, particularmente em áreas onde estão disponíveis dados detalhados (Zwahlen, 2003).

É baseado em tecnologia SIG, e foi desenvolvido por Nico Goldscheider *et al.* (2000), no trabalho “*The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers*”, para se fazer o estudo da vulnerabilidade intrínseca com base em

dois fatores, P e I. Os esquemas de avaliação detalhados para os dois fatores podem ser encontrados em Goldscheider *et al.* (2000), Goldscheider (2002) e no relatório final da Ação Europeia COST 620 (Zwahlen, 2003).

O método considera a proteção das camadas acima da zona saturada (P) e as condições de infiltração da área (I) (Figura 5). Pode ser utilizado em todos os tipos de aquífero mas apresenta ferramentas especiais para a avaliação do carste.

O fator P representa a função protetora de todas as camadas entre a superfície e o lençol freático, sendo elas: parte superior do solo (Horizontes A e B), parte inferior do solo, rochas não cársticas e camada de rochas cársticas não saturadas sobreposta à zona vadosa (Goldscheider, 2005).

O nível de proteção é avaliado com base na capacidade de campo efetiva do solo (CEF), a distribuição de tamanho de grão do subsolo, a litologia, o fraturamento de rochas não-cársticas, o nível de carstificação de rochas cársticas, a espessura de todos os estratos, a recarga anual média e a pressão artesianas no aquífero (Zwahlen, 2003).

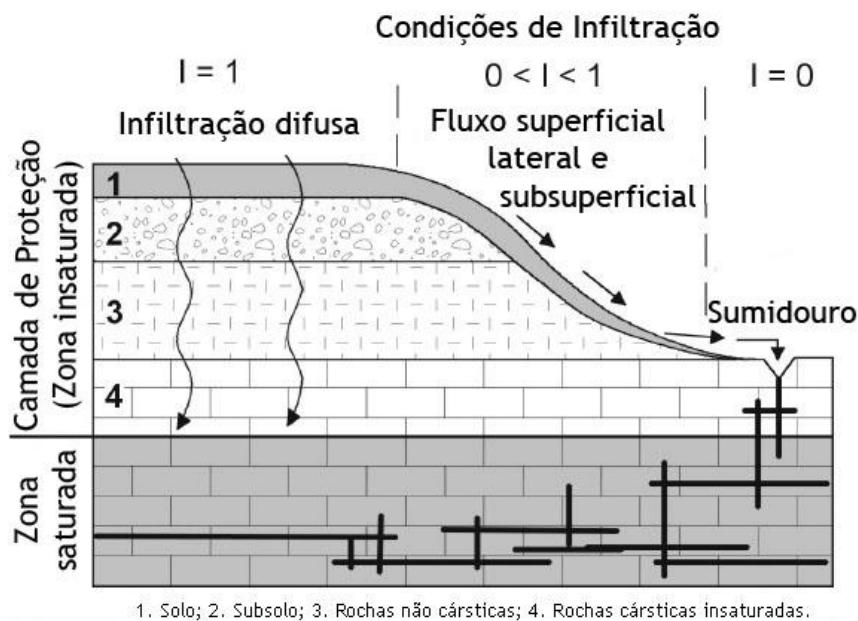
O intervalo de pontuação total é dividido em cinco classes, sendo a primeira ( $P = 1$ ) correspondente a um grau extremamente baixo de proteção, à medida que camadas sobrepostas muito grossas e protetoras recebem valores máximos  $P = 5$  (Tabela 7). Uma escala logarítmica é aplicada, de modo que uma proteção dez vezes maior faz o fator P aumentar em uma classe, ou valor (Goldscheider, 2005).

O fator I, crucial para a aplicação do método em áreas cársticas, representa as condições de infiltração, isto é, o grau em que a camada protetora é transpassada pela água como resultado do fluxo que infiltra no aquífero cárstico por condutos diretos como por exemplo sumidouros.

Os valores desse fator variam entre 0,0 e 1,0 (Tabela 7). O valor máximo (1) corresponde a um solo horizontal, altamente permeável, em que a recarga irá ocorrer de forma difusa, ou seja, por infiltração e subsequente percolação. Em contraste, associado ao valor mínimo (0) tem-se encostas íngremes feitas de solo com baixa permeabilidade que concentram o escoamento superficial em direção a drenagens superficiais ligadas a sumidouros. Para todas as outras áreas são atribuídos valores intermediários (0,2; 0,4; 0,6; 0,8), dependendo das propriedades que controlam o processo predominante de fluxo, a declividade, a vegetação e a posição de um determinado ponto no interior ou exterior da área de drenagem de rios relacionados a sumidouros (Goldscheider, 2005).

A Figura 5 indica as situações de ponderação para cada valor dentro dos fatores considerados, sejam eles: P e I.

Figura 5: Ilustração dos parâmetros e valores associados ao método PI.



Fonte: Modificado de Goldscheider (2005).

O índice de vulnerabilidade intrínseca final é dividido em 5 classes sendo o resultado do produto dos fatores P e I, conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Fatores e valores relacionados para o método PI.

Mapa da Vulnerabilidade		Mapa Subfator <i>P</i>		Mapa Subfator <i>I</i>	
Vulnerabilidade da água subterrânea		Proteção das camadas sobrepostas		Grau de “bypassing”	
Descrição	Fator $P_i$	Descrição	Sub fator $P$	Descrição	Sub fator $I$
Extremo	0-1	Muito Baixo	1	Muito Alto	0,0-0,2
Alto	>1-2	Baixo	2	Alto	0,4
Moderado	>2-3	Moderado	3	Moderado	0,6
Baixo	>3-4	Alto	4	Baixo	0,8
Muito Baixo	>4-5	Muito Alto	5	Muito Baixo	1,0

Fonte: Goldscheider (2005).

### 2.2.2.3. COP

O método COP é uma importante ferramenta para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos cársticos. Pode ser considerado uma evolução dos métodos específicos expostos nos itens 2.2.2.1 (EPIK) e 2.2.2.2 (PI). Por sua relação direta com o presente trabalho, o método COP será detalhado separadamente no item 5 (métodos aplicados), no sub item 5.1 (método COP).

### 3. MATERIAIS EMPREGADOS

#### 3.1. Dados Primários

Os dados primários foram coletados a partir de duas campanhas de campo realizadas nos períodos de 07/07/2015 a 15/07/2015, e 11/08/2015 a 17/08/2015, além de visitas de curta duração visto a proximidade da área com a RMBH.

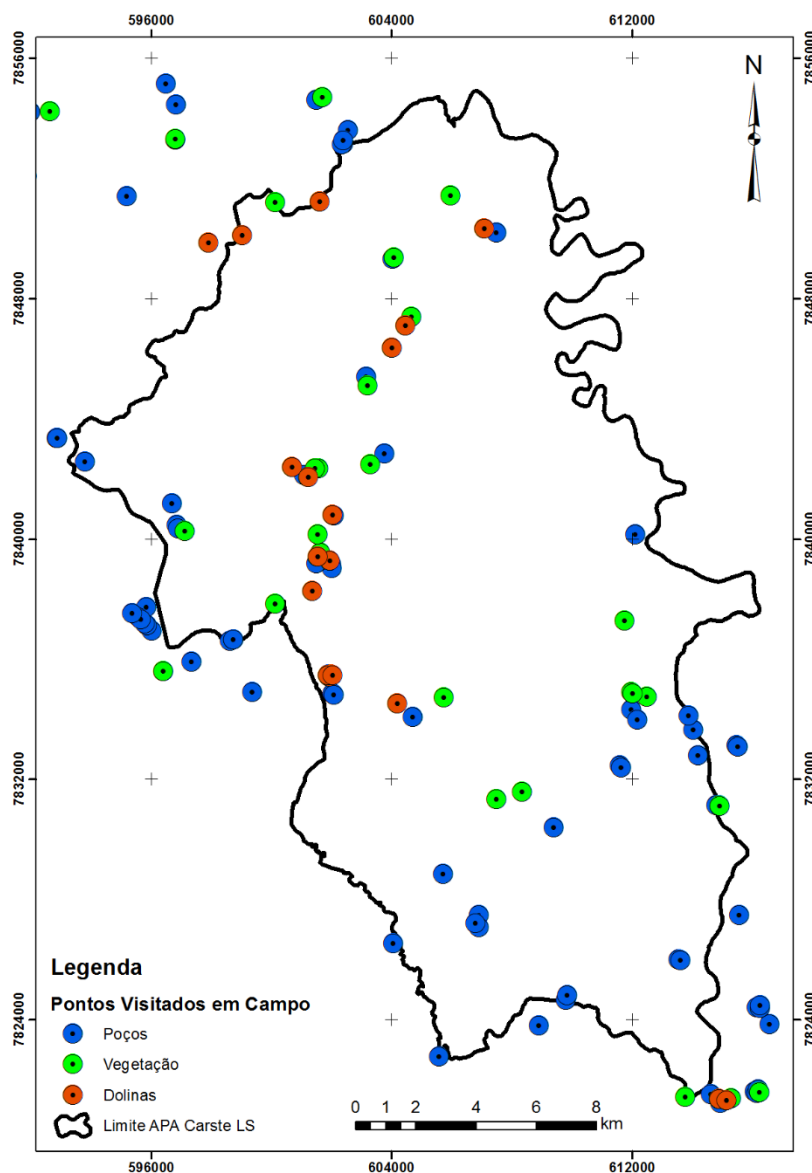
As campanhas de campo foram focadas em coletar pontos de checagem verificativa para as metodologias de “mapeamento semiautomático de identificação de dolinas” e “identificação de áreas com vegetação representativa”, e a situação atual dos poços identificados no banco de dados do SIAGAS para a atualização dos seus níveis estáticos.

Foi checada a situação de 84 poços profundos e cisternas, e coletados 51 pontos de verificação sendo 23 pontos de dolinas e 38 de vegetação (Figura 6). A Tabela 8 discretiza os principais dados e características inferidas em campo. Foram também checados pontos fora da área para uma compreensão mais abrangente do sistema. As informações de campo podem ser consultadas na íntegra no Apêndice I. É importante ainda, salientar que foram extraídas mais de uma informação em algumas localidades, por exemplo ao checar a situação de poços em zona rural foi também aferida a vegetação circundante.

Tabela 8: Dados coletados em campo

<b>Ponto visitados</b>	<b>Número de amostras</b>
Dolinas	23
Vegetação	38
Poços e cisternas	84

Figura 6: Dados coletados em campo.



### 3.2. Dados Secundários

As informações secundárias utilizadas foram obtidas através de uma intensa busca bibliográfica, majoritariamente em bancos de dados abertos ao público com acesso gratuito, onde foram reunidos dados fundamentais para a correta aplicação do método de vulnerabilidade.

O inventário de dados secundários incluiu cartas topográficas, imagens de satélite, levantamento de pontos d'água (poços profundos, cisternas e nascentes), mapas temáticos (solos, hidrografia, geologia, geomorfologia, uso e ocupação do solo, etc.), séries históricas de estações pluviométricas, além de estudos conduzidos anteriormente dentro da área proposta, e, bibliografias referentes a métodos e informações gerais pertinentes ao tema.

Para tanto foram consultados os seguintes bancos de dados:

- Agencia Nacional de Águas (ANA):

- Hidroweb (séries históricas de estações pluviométricas e climatológicas);
- Serviço Geológico do Brasil (CPRM):
  - SIAGAS - cadastro de poços tubulares e cisternas;
- Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE):
  - Banco de Cartas topográficas - topografia e hidrografia;
- Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE):
  - Dados de estações climatológicas;
- Serviço Geológico Norte Americano (USGS)/ NASA:
  - GeoExplorer - acervo de imagens de satélites: SRTM e LANDSAT 8.
- Google Inc.:
  - Plataforma Google Earth Pro 7.1.
- Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV):
  - Base de Dados Geoespacializados de Cavidades Naturais Subterrâneas.

Os trabalhos analíticos mais significativamente abrangentes feitos na região estudada, que se destacam para a utilização no presente estudo, são: Projeto APA Carste Lagoa Santa (1998) e Projeto VIDA: viabilidade industrial e defesa ambiental (2003), ambos realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), sendo o APA Carste em parceria com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA).

Pode-se citar também os estudos de Ribeiro (1995), Pessoa (1996), Piló (1998), Cartelle *et al.* (1998), Berbert-Born (2002), Meneses (2003), Baeta (2011), dentre outros.

Nos relatórios da APA Carste Lagoa Santa podem ser encontrados grande parte dos dados secundários necessários para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca proposta, sendo eles:

- Geomorfologia: Cartografia na escala 1:50.000 referente às grandes unidades geomorfológicas com delimitação cartográfica e compartimentação das principais feições do relevo cárstico e não-cárstico;
- Pedologia: Mapa de caracterização pedológica dos terrenos na escala 1:50.000;
- Hidrologia: Caracterização hidrológica regional, disponibilidade hídrica, uso e qualidade das águas superficiais;
- Hidrogeologia: Levantamento hidrogeológico em escala 1:50.000. Uso e qualidade das águas subterrâneas. Estudo dos aquíferos e análise de suas potencialidades e vulnerabilidade;
- Espeleologia: Inventário em escala 1:50.000 e reconhecimento das cavernas existentes, com definição de áreas de diferentes potenciais de ocorrência. Descrição e estudos espeleológico e biológico das cavernas mais importantes;

- Vegetação: Caracterização das diferentes formações vegetacionais 1:50.000.

Projeto VIDA:

- Geologia: Mapa geológico na escala 1:50.000;

A partir dos dados gerados por essa avaliação e os dados coletados em campo foi possível angariar informações suficientes para a aplicação do estudo da vulnerabilidade intrínseca pelo método proposto na análise do presente trabalho.

### 3.3. Imagens de Satélite

#### 3.3.1. SRTM

Executada pelo ônibus espacial *Endeavour* durante 11 dias em fevereiro de 2000, a missão espacial de topografia por radar *SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)* é um projeto internacional conjunto entre a Agência Norte Americana de Inteligência Geoespacial (NGA), a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), a Agência Espacial Italiana (ASI) e o Centro Aeroespacial Alemão (DLR), que teve por objetivo obter a mais completa base digital em alta resolução de dados topográficos da Terra. Para a coleta das informações utilizou-se de um pacote interferométrico de abertura sintética (SAR), com sinais de micro-ondas nas bandas C ( $\lambda \sim 5,6\text{cm}$ ) e X ( $\lambda \sim 3\text{cm}$ ). Uma haste mecânica presa à nave levou em sua extremidade dois receptores SAR propiciando a geração de uma angulação lateral responsável pelo fornecimento dos dados de elevação.

Os dados foram processados no Laboratório de Propulsão a Jato (*Jet Propulsion Laboratory - JPL*) da NASA, e são distribuídos gratuitamente através do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). A cobertura dos dados abrange a maior parte da superfície emersa da Terra entre as latitudes 60° Norte e 56° Sul e foram extraídos por interferometria de radar. Os pontos de amostragem foram locados a cada 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros), e apresentam precisão em elevação vertical absoluta de 16 metros, com 90% de confiança (NASA, 2015).

Segundo Moura *et al.* (2005), as imagens obtidas pelo SRTM têm garantido amplas aplicações nos estudos espaciais, desde os processos de comunicação visual até a produção de cartografia básica de precisão e mapas de análise espacial.

Para o processamento dos dados altimétricos foram utilizadas duas imagens SRTM, localizadas entre as coordenadas 19° e 20° S, e 43° e 45° O, retiradas do catálogo de imagens do USGS. Cada imagem tem uma dimensão total aproximada em planta de 110 km Norte-Sul, e 105 km Leste-Oeste.



### 3.3.2. LANDSAT 8

O satélite Landsat 8 (OLI/TIRS) foi lançado ao espaço em 11 de fevereiro de 2013, na chamada “*Missão de continuidade dos Dados Landsat*” (LDCM), em uma colaboração entre a NASA e o USGS.

É o oitavo da série de satélites do Programa Landsat com captura da superfície da terra nas frequências visível, infravermelho próximo, infravermelho de onda curta e infravermelho termal, com resolução moderada, dependendo da frequência espectral. Opera com dois instrumentos imageadores: o *Operational Terra Imager (OLI)* e o *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*.

As bandas multiespectrais (OLI) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, e 9 possuem uma resolução de 30 metros. A banda 1 (ultra-azul) pode ser utilizada para estudos costeiros e aerossol; a banda 9 (cirrus) é útil para a detecção de nuvens; as bandas termais 10 e 11 pertencem ao instrumento imageador TIRS com uma resolução de 100 metros e são úteis no fornecimento de temperaturas de superfície mais precisas; e, a banda 8 (pancromática; OLI) possui uma resolução de 15 metros (Tabela 9). O tamanho total aproximado da cena Landsat-8 é de 170 km ao Norte-Sul por 183 km a Leste-Oeste (NASA, 2014).

Tabela 9: Bandas espectrais presentes na imagem Landsat 8

Banda	Descrição	Frequência espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolução (m)	
1	Coastal/ Aerosol	Costeiro/ Aerosol (Ultra Azul)	0,435 – 0,451	30
2	Blue	Azul	0,452 – 0,512	30
3	Green	Verde	0,533 – 0,590	30
4	Red	Vermelho	0,636 – 0,673	30
5	NIR	Infravermelho Próximo	0,851 – 0,879	30
6	SWIR-1	Infravermelho de onda curta 1	1,566 – 1,651	30
7	SWIR-2	Infravermelho de onda curta 2	2,107 – 2,294	30
8	PAN	Pancromática	0,503 – 0,676	15
9	CIRRUS	CIRRUS	1,363 – 1,384	30
10	TIR-1	Infravermelho Termal -1	10,60 – 11,19	100
11	TIR-2	Infravermelho Termal -2	11,50 – 12,51	100

Fonte: NASA (2014).

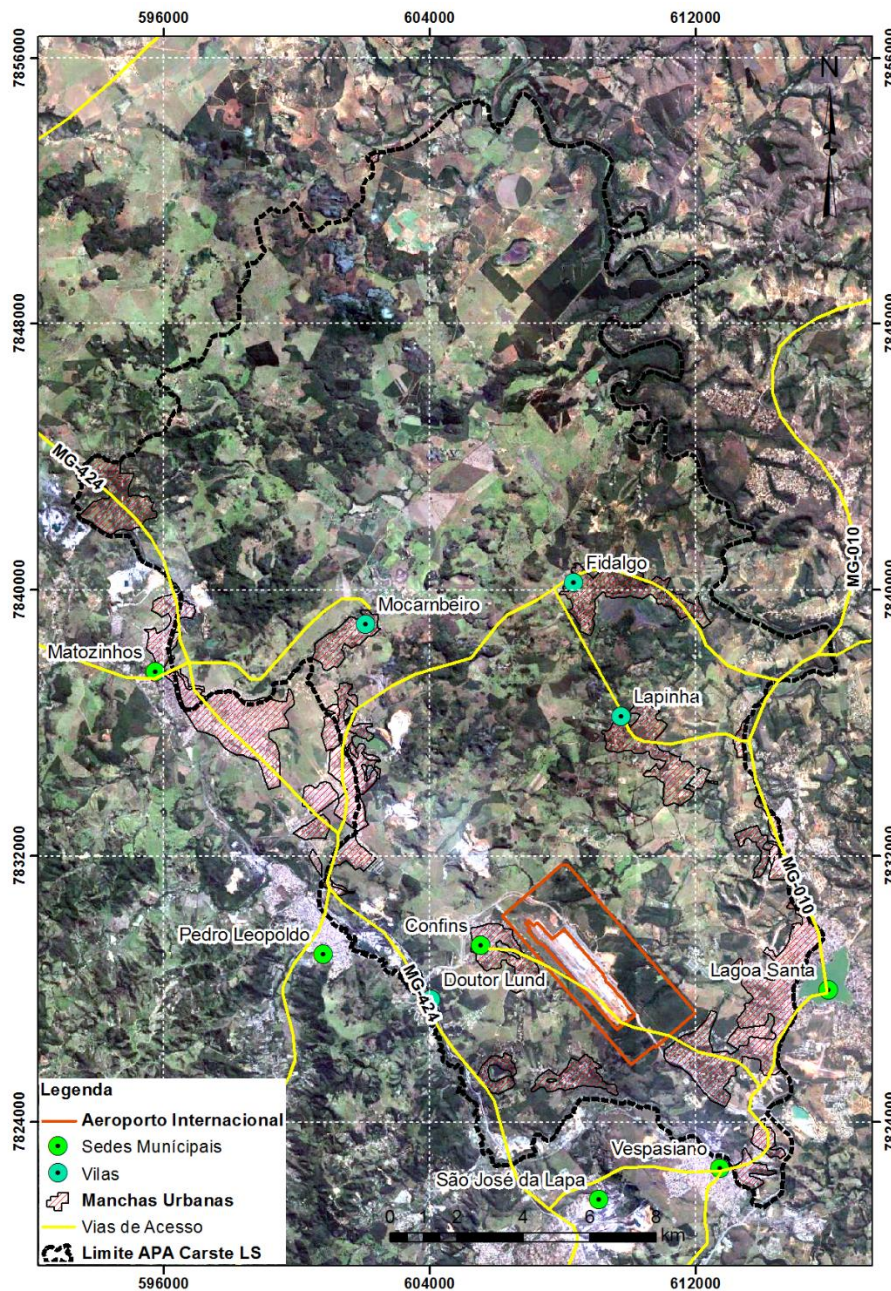
No presente trabalho foi utilizado uma imagem Landsat 8, obtida por meio de download gratuito no catálogo de imagens do USGS, no Earth Explorer, com passagem no dia 28 de agosto de 2014 (Órbita 218/Ponto 74) (USGS, 2014).

## **4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

### **4.1. Aspectos Gerais**

A unidade de proteção ambiental “Carste de Lagoa Santa”, situada na RMBH, Minas Gerais (Figura 7), é uma unidade de conservação de uso sustentável instituída pelo decreto nº 98.881 de 25 de janeiro de 1990, resultado da necessidade de se controlar a pressão do desenvolvimento econômico sobre a região, com reconhecida fragilidade física e de grande valor científico e cultural (Baeta, 2011). Sua área cobre uma extensão de aproximadamente 40 mil hectares e abrange partes dos municípios de Confins, Lagoa Santa, Matozinhos, Funilândia, Pedro Leopoldo e Prudente de Morais, assim como as vilas pertencentes a alguns desses municípios como Lapinha (Lagoa Santa), Mocambeiro (Matozinhos) e Fidalgo (Pedro Leopoldo) em sua totalidade e uma pequena parte da vila Doutor Lund (Pedro Leopoldo). Manchas urbanas ocupam aproximadamente 10,3% da área, ou 4.135 hectares, o que mostra uma urbanização não tão densa, porém, a região sofre com a ocupação desordenada em alguns pontos, além das atividades referentes à agropecuária e mineração.

Figura 7: Localização da APA Carste Lagoa Santa com vias de acesso, manchas urbanas, sedes municipais.



Fonte: Modificado de IBAMA (1998). Imagem *Google Earth Pro*.

O Carste de Lagoa Santa é considerado o berço da paleontologia, arqueologia e espeleologia no Brasil, com um grande significado para a cultura e geociências do país por sua quantidade de feições cársticas, tais como: as dolinas, que ocorrem em densidade bastante elevada, grutas, cavernas e abrigos, que guardam grande quantidade de registros fósseis de animais extintos no período Pleistoceno, e ainda, “Luzia”, um dos fósseis humano mais antigos encontrado nas américas (Neves *et al.* 2008). A área foi incluída pelo SIGEP (Comissão Brasileira dos sítios Geológicos e Paleobiológicos) como patrimônio geológico e paleobiológico mundial.

Tem seus limites definidos pelo Rio das Velhas na porção leste e pelo Ribeirão da Mata na região sudoeste-oeste. Ao norte, as bacias do Riacho da Gordura e do Córrego da Flor fecham o

perímetro da APA, perfazendo uma área de aproximadamente 403,53 km<sup>2</sup>, totalmente integrada à Bacia do Rio das Velhas, localizada dentro da grande bacia hidrográfica do rio São Francisco.

A vegetação da área é considerada de transição sob a influência do cerrado e mata atlântica, com remanescentes da cobertura vegetal constituído de “ilhas” de variados tamanhos decorrentes da alteração da paisagem natural por atividades relacionadas a minerações de calcário, extração de argila e areia, bem como agropecuária. Não é incomum vegetação semelhante à da caatinga em áreas de afloramentos calcários. Observam-se ainda áreas de plantio de *Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.*

As principais vias de acesso são a MG-010, que é coincidente com os limites da APA na margem sudoeste, e a MG-424, limítrofe na margem sudeste. Partindo do sul para o centro-oeste estão as vias de acesso ao Aeroporto Internacional Tancredo Neves. Existem também estradas menores, pavimentadas ou não, que fazem as conexões entre os municípios e vilas. A densidade da malha viária decresce no sentido sul – norte e tem uma extensão total de 81,3km, segundo o banco de dados do IBGE (item 3.2 – Dados Secundários).

O ICMBio é responsável pelo gerenciamento da unidade de conservação e tem como principais objetivos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais.

A caracterização física, a seguir, foi baseada em estudos conduzidos na área, principalmente nos volumes do estudo “APA Carste de Lagoa Santa” (IBAMA, 1998), e VIDA (CPRM, 2003).

#### **4.2. Condições Climáticas**

A região onde se localiza a APA Carste de Lagoa Santa está associada às condições médias gerais da circulação atmosférica sob o domínio do sistema estacionário denominado Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. Este sistema apresenta elevado grau de umidade absoluta e elevada temperatura interior devido à intensa radiação solar incidente. No entanto, apresenta condições de estabilidade atmosférica devido aos efeitos de subsidência ou correntes verticais descendentes (IEF, 2010).

De acordo com a classificação de KÖPPEN a área é enquadrada na categoria Aw1, definida como um clima quente, com temperatura no mês mais frio superior a 18 °C, e duas estações alternadas, uma chuvosa (verão), e outra seca (inverno), com amplitudes térmicas anuais inferiores a 5°C (Ribeiro, 1995).

As variáveis climáticas representadas na Tabela 10 foram avaliadas pelos órgãos federais: INMET (INMET, 2014) e EMBRAPA – Milho e Sorgo (EMBRAPA, 2011), baseado na série de dados históricos da estação climatológica de Sete Lagoas, pertencente ao INMET, a mais próxima da APA Carste de Lagoa Santa, no período de 1961 até 1990. Além dessa, mais 3 estações

pluviométricas podem ser consideradas dentro da área de influência da APA, são elas: Vespasiano, Fazenda Vargem Bonita e Pedro Leopoldo (apresentadas no item 6.3 – Fator “P”).

Tabela 10: Dados da estação climatológica “Sete Lagoas”, no município de Sete Lagoas (MG).

Altitude: 732 m Período: 1961-1990

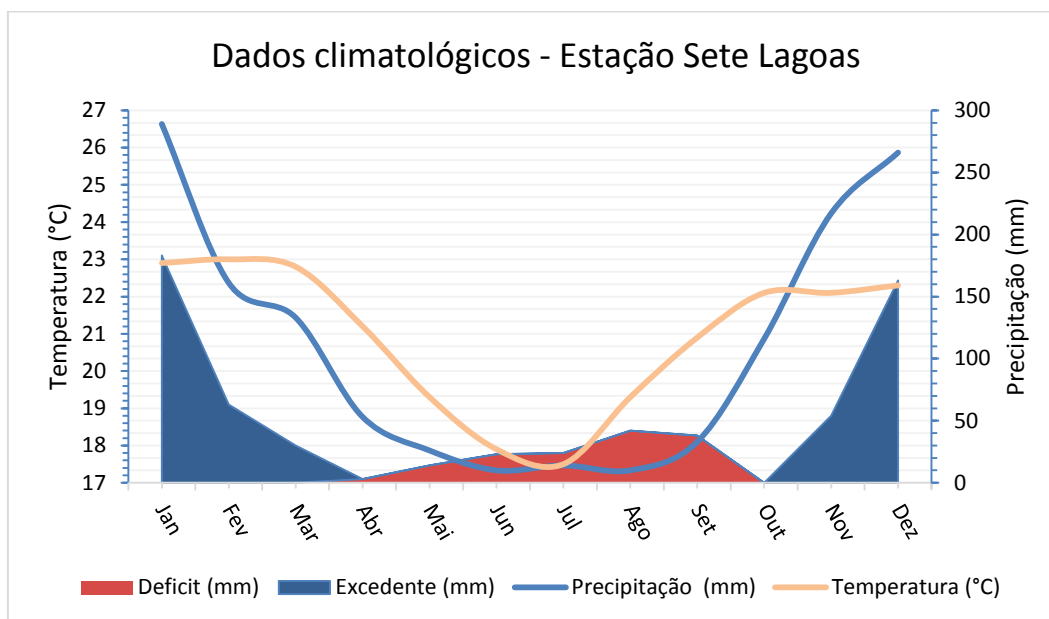
Mês	T (°C)	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan	22,9	289	106	106	0	183
Fev	23,0	161	98	98	0	63
Mar	22,8	133	103	103	0	30
Abr	21,2	53	80	77	3	0
Mai	19,3	26	63	50	14	0
Jun	17,9	10	50	27	23	0
Jul	17,5	14	49	24	24	0
Ago	19,3	10	62	20	42	0
Set	20,9	33	76	38	38	0
Out	22,1	116	94	94	0	0
Nov	22,1	217	95	95	0	54
Dez	22,3	266	103	103	0	163
<b>TOTAIS</b>		<b>1.328</b>	<b>979</b>	<b>835</b>	<b>144</b>	<b>493</b>
<b>MÉDIAS</b>	<b>20,9</b>	<b>111</b>	<b>82</b>	<b>70</b>	<b>12</b>	<b>41</b>
<b>ETP- Evapotranspiração Potencial</b>			<b>DEF- Deficit</b>			
<b>ETR- Evapotranspiração Real</b>			<b>EXC- Excedente</b>			

Fonte: INMET (2014).

A média termométrica anual é da ordem de 20,9°C com o inverno ameno, às vezes com temperaturas mais baixas associadas à invasão de frentes frias advindas do anticiclone polar, e o verão quente e prolongado. O mês mais frio é julho com temperatura média de 17,5°C e fevereiro o mais quente com médias em torno de 23°C. O regime de ventos segundo Kohler (1989), tem total de 16,02% direcionados para norte, e 52,74% direcionados para nordeste.

O déficit hídrico ocorre dos meses de abril a setembro, com um máximo de 42mm em agosto. Já o excedente ocorre entre novembro e março, com um máximo de 183mm em janeiro. A estação chuvosa é bem definida e estende-se entre outubro e março, passando por períodos de transição entre o seco e o chuvoso nos meses de setembro e abril. As precipitações apresentam uma média mínima de 10mm em junho e agosto, e máxima de 289mm em janeiro, o total anual é de 1328mm (Gráfico 1). Dentre os fatores de intemperismo atuantes no carste o meio atmosférico tem uma grande importância, já que é umas das formas de incorporação de CO<sub>2</sub> no sistema, principal componente da dissolução.

Gráfico 1: Dados climatológicos da estação Sete Lagoas.



Fonte: Adaptado de INMET (2014).

### 4.3. Hidrografia

A área localiza-se na depressão do Alto-Médio Rio São Francisco e integra-se à sub-bacia do rio das Velhas (IBGE, 2006). A área de drenagem desta sub-bacia na APA em estudo equivale a 403,53 km<sup>2</sup>, o que representa 1,45% da área total da sub-bacia do Rio das Velhas (Meneses, 2003).

Em função das características cársticas, grande parte das drenagens apresenta padrão criptorréico, onde, segundo Guerra (1993), a drenagem subterrânea acaba surgindo em fontes ou integrando-se em rios subaéreos. A APA Carste pode ser enquadrada como um terreno majoritariamente fluviocárstico, onde, o fluxo de água superficial e subterrâneo se misturam. Às vezes, redes de drenagem superficiais são interrompidas por formações cársticas causando um desvio de escoamento superficial para o sistema subterrâneo (Darnault, 2008), consequência da evolução do ambiente cárstico por dissolução, sobreposta a uma antiga paisagem fluvial. Salienta-se a existência de várias lagoas, geralmente, intermitentes, associadas a esse sistema.

Os principais cursos d'água da área são exatamente os coincidentes com os limites da APA, ou seja, o rio das Velhas a E-NE-N e o ribeirão da Mata, no extremo sul (IBAMA, 1998).

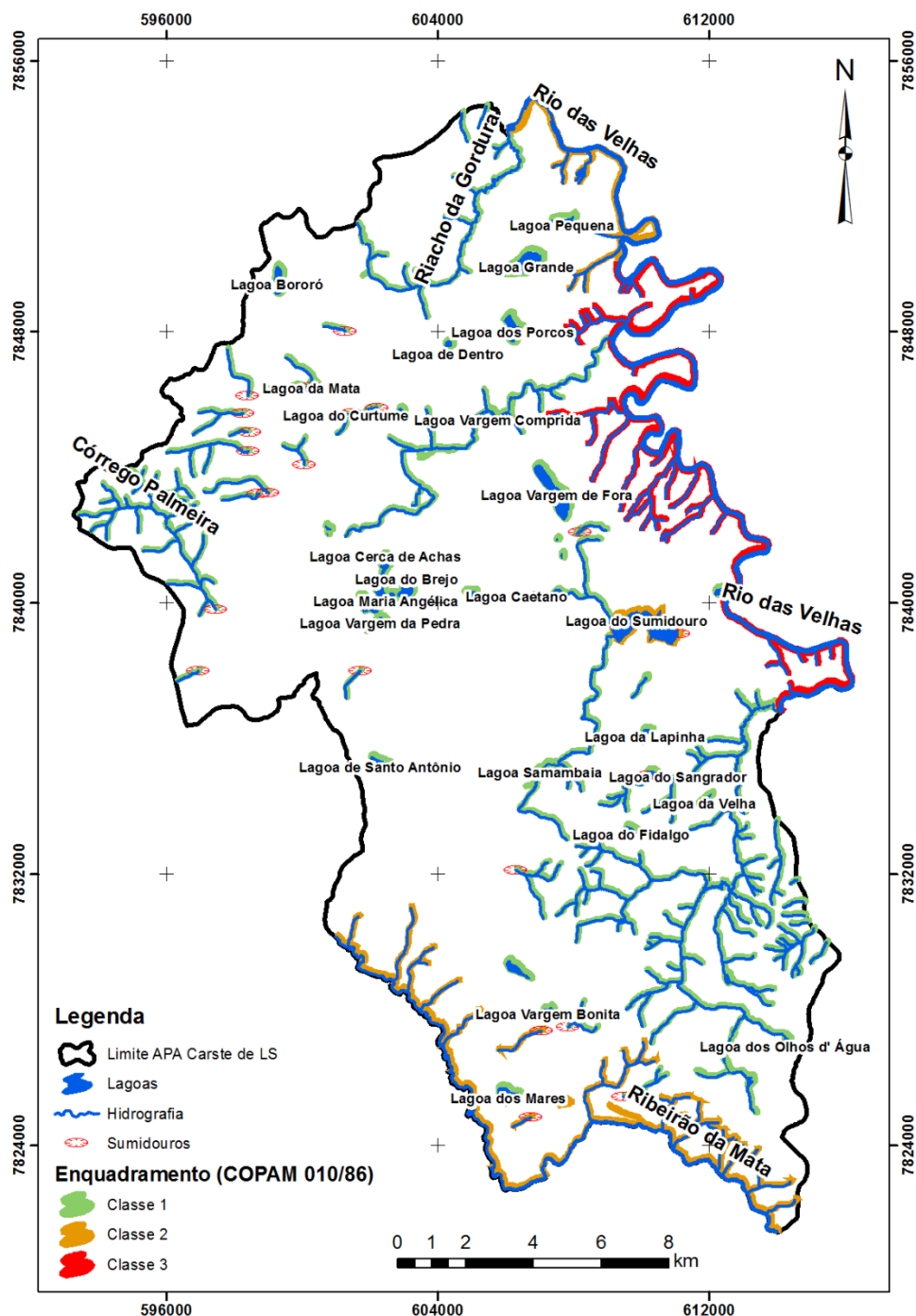
As sub-bacias hidrográficas mais representativas das zonas carstificadas são definidas pelos córregos Samambaia, o qual drena para a lagoa do sumidouro, Palmeiras, Mucambo, Jaragua e riacho da Gordura para onde são drenadas as águas pluviais capturadas, em grande parte, pelos inúmeros dolinamentos distribuídos ao longo da área (IBAMA, 1998). Os limites dessas bacias ainda não estão perfeitamente reconhecidos, porque muitas rotas de fluxo subterrâneo ainda são desconhecidas, mas todas elas têm descarga final no rio das Velhas (CETEC, 1984). Há ainda os Domínios do Córrego

do Jaque e do Ribeirão da Mata, onde a presença de poços com grandes vazões é característica marcante no último (IBAMA, 1998).

Segundo Berbet-born (2002), pode-se observar uma associação preferencial entre as direções das principais drenagens e o alinhamento de dolinas e escarpas a um dos principais sistemas de fraturas que compartimentam as rochas da área.

A Figura 8 representa a hidrografia local com as drenagens mapeadas, feições geomorfológicas cársticas e lagoas.

Figura 8: Mapa da Hidrografia da APA Carste de Lagoa Santa.



Fonte: Modificado de IBAMA (1998) e BRASIL (1986)

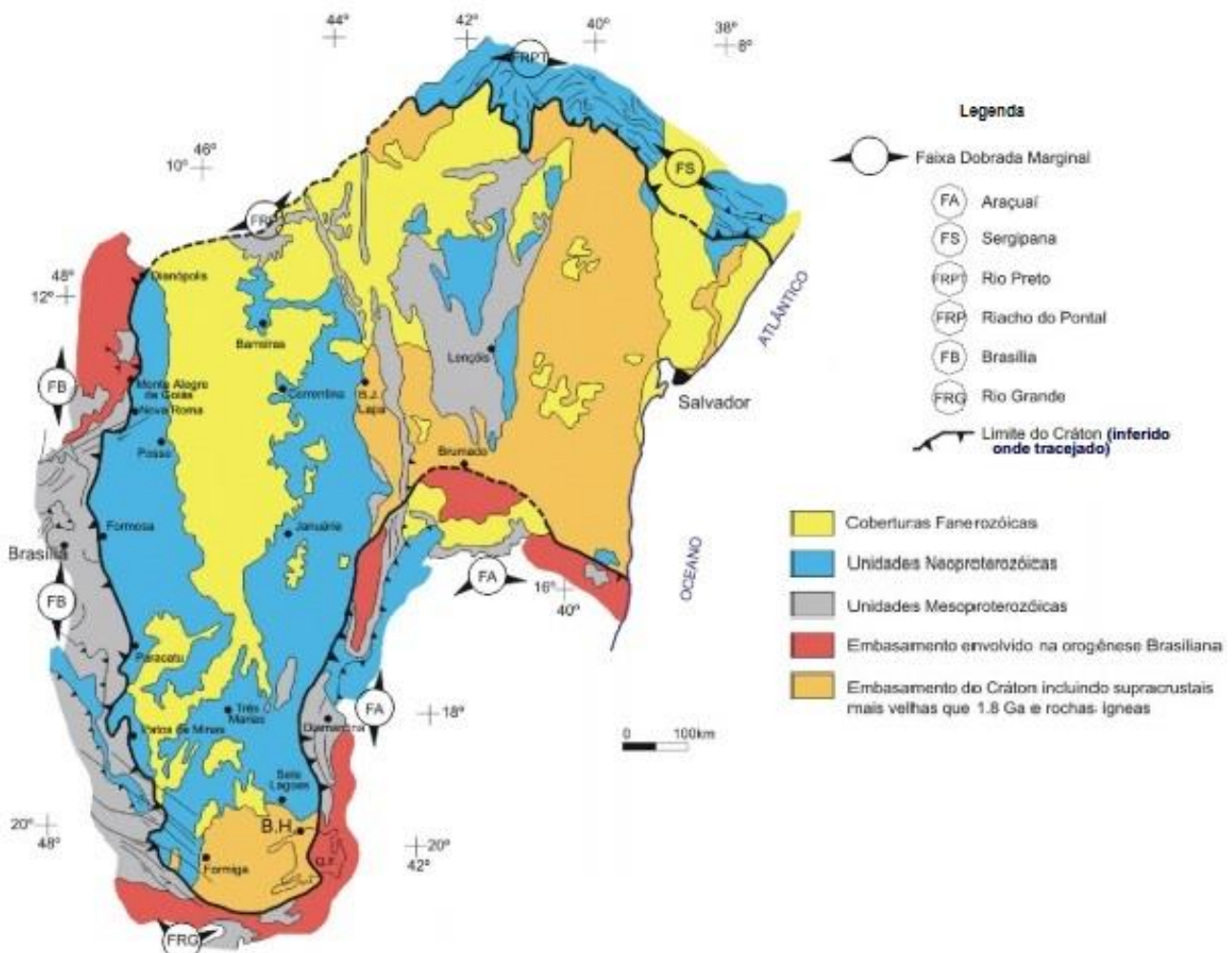


#### 4.4. Geologia

A área se encontra na porção sudeste da denominada província tectônica do Cráton São Francisco que fez parte do Cráton Congo-Zaire no supercontinente Gondwana até o final da era Mesozóica (Alexandrino *et al.* 2011), o qual representa um extenso núcleo estabilizado do Ciclo Transamazônico do final do Proterozóico Inferior (Almeida, 1977).

A plataforma do São Francisco, constituída por um embasamento de idade Arqueana, compreendida pelos Supergrupos Espinhaço e São Francisco, teria se comportado como uma megaestrutura estável de sedimentação que possibilitou o recobrimento parcial por sedimentos de idade Neoproterozóica, formados principalmente de carbonatos argilo arenosos, que deram origem ao Grupo Bambuí (Branco e Costa, 1961; Oliveira 1967; Dardene 1978; Ribeiro *et al.* 2003; Tuller *et al.* 2010 citado por Galvão, 2015). Abrange principalmente a região centro e norte do estado de Minas Gerais e centroeste da Bahia, com seu contorno definido pelas frentes orogênicas do final do Proterozóico (Figura 9). No Estado de Minas Gerais é limitado pelas faixas marginais de dobramentos Brasília, Alto do Rio Grande e Araçuai (Almeida, 1977).

Figura 9: Limites do Cráton São Francisco.

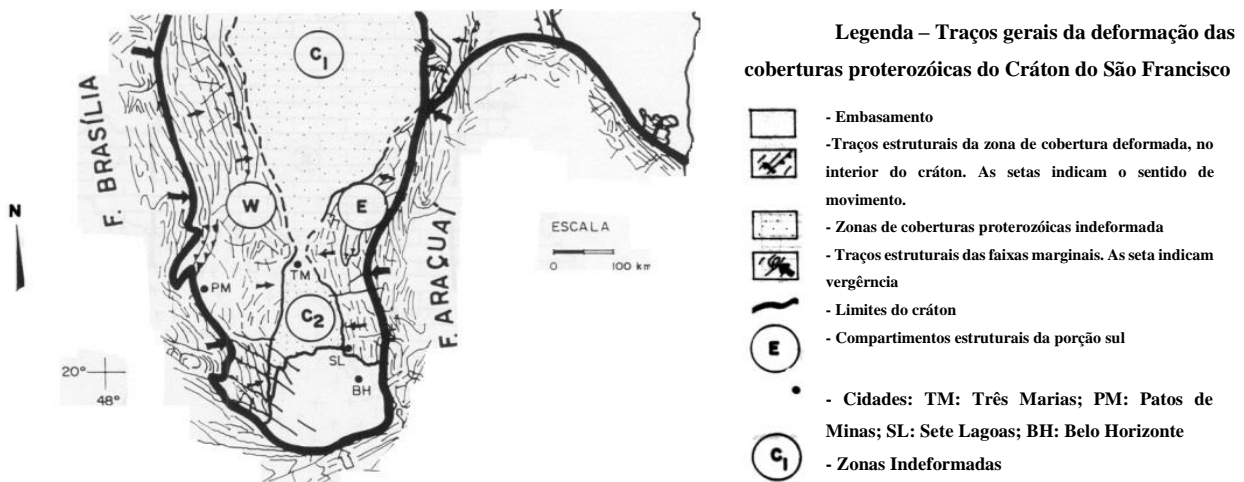


Fonte: Definição de Almeida (1977, 1981). Modificado de Alkmim *et al.* (1993). Apud Pereira (2007).

É importante ressaltar a influência tectônica brasileira das faixas Brasília e Araçuaí, nas bordas E e W do Cráton São Francisco, responsáveis por dobramentos as vezes intensos (Baptista, 2004). Estruturalmente, de acordo com Piló (1998), a região de Lagoa Santa sofreu deformações em consequência da ação dessas faixas móveis adjacentes.

A Figura 10 ilustra o arcabouço tectônico da porção sul do cráton, cuja deformação de vergência centrípeta individualizou as respectivas faixas deformadas nos extremos, poupando os compartimentos (C1 e C2) na parte central (Silva, 2003).

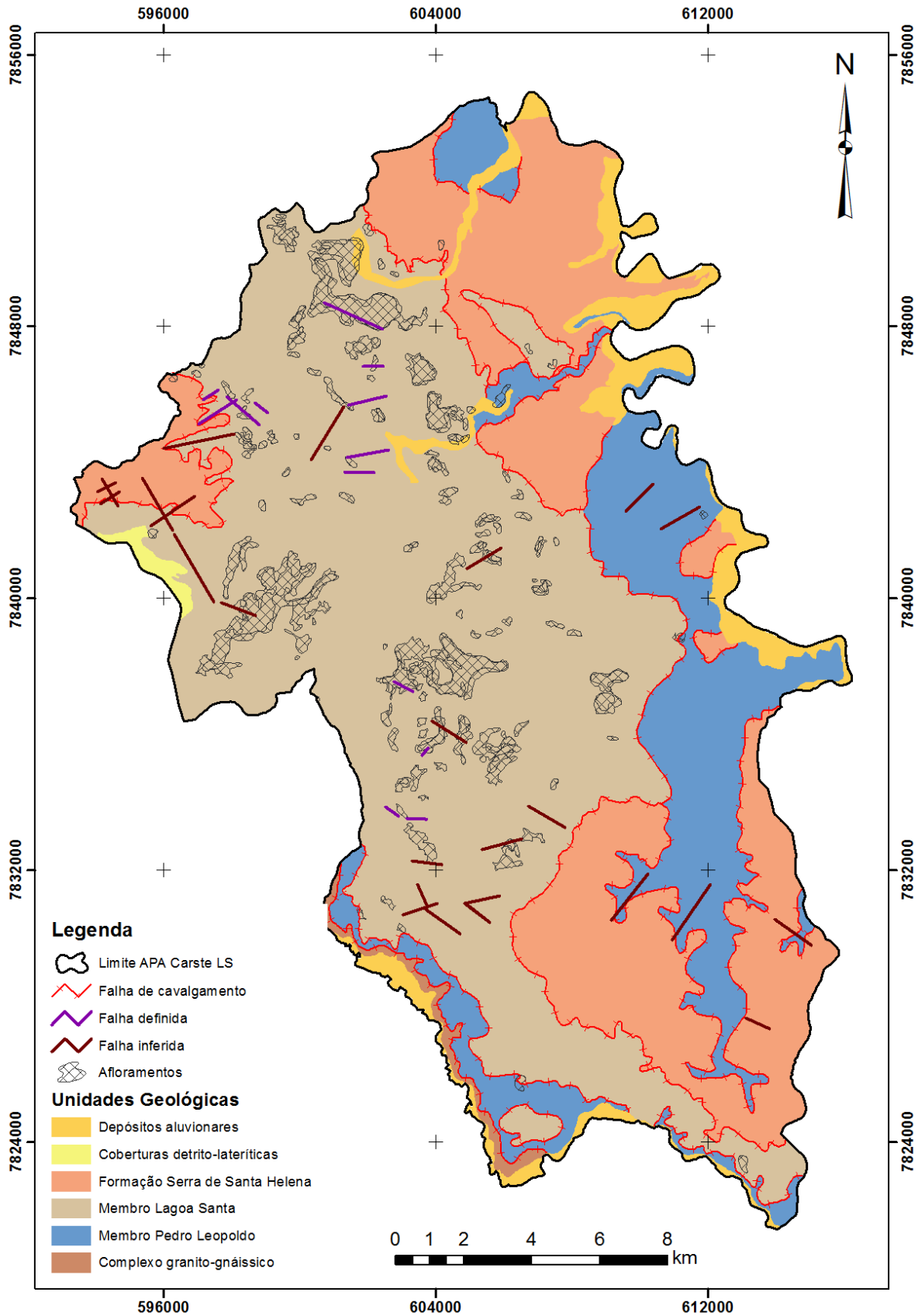
Figura 10: Arcabouço tectônico da porção sul do cráton São Francisco



Fonte: Adaptado de Alkmim *et al.* (1993).

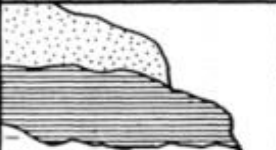
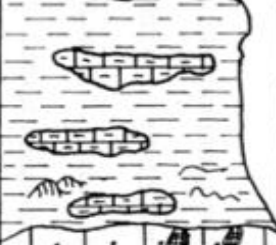
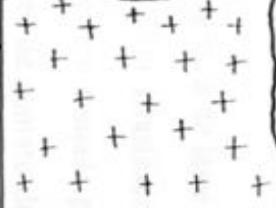
A Figura 11 ilustra o mapa geológico da área, realizado originalmente em escala 1:50.000, pelo projeto VIDA, e a Tabela 11 a descrição das unidades litoestratigráficas. A descrição a seguir será feita a partir da análise geológica da região e seguindo a coluna estratigráfica proposta por CPRM (2003) e IBAMA (1998).

Figura 11: Mapa geológico da APA Carste de Lagoa Santa adaptado de CPRM (2003).



Fonte: Adaptado de CPRM (2003).

Tabela 11: Principais unidades litoestratigráficas da APA Carste de Lagoa Santa.

SUPER GRUPO	GRUPO	FORMAÇÃO	MEMBRO	IDADE ma	ESPESSURA (m)	LOCAL tipo	COLUNA	LITOLOGIA	AMBIENTE DEPOSICIONAL
					0-40			Aluviões compostos por areias de várias granulometrias e cascalho.	
					0-30			Coberturas detritico-lateríticas com camadas delgadas lateríticas.	
S Ã O  F R A N C I S C O	B A M B U Í	SERRA DE SANTA HELENA		600	200	SERRA DE SANTA HELENA		Metapelitos em camadas tabulares de espessura média a espessa, de cor esverdeada a preta quando são. Marcas onduladas suaves, estruturas de carga e estratificação cruzada. Intercaladas por camadas tabulares delgadas a média de metassilito calcífero de cor esverdeada a acinzentada.	Transgressão marinha, afogamento plataformal
		S E T E	LAGOA SANTA	800	80	PEDREIRA CARVÃO		Metacalcarenito variando de fino a grosseiro em camadas tabulares de espessura média a espessa, coloração do preto ao cinza. No topo, identificadas bioconcentrações algálicas de cor escura. Estromatólitos do gênero "Gymnosilenida". Posto da Polícia Rodoviária de Sete Lagoas.	Marinho, plataforma externa para plataforma rasa, no
		L A G O A S	PEDRO LEOPOLDO	100	PEDREIRAS CANAÃN e ILCON	Calcissilito em camadas tabulares de espessura delgada a média, coloração variando de cinza claro a esverdeado, com intercalações de camada muito finas a delgadas de metargilitos (Laminitos algálicos).		topo marinho raso, borda de plataforma	
COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO						PEDREIRA DA PREFEITURA		Gnaisses indiferenciados, migmatitos com estruturas dobradas, nebulítica, dictomítica, schiliren. Estiliolítica e surreítica. Porções graníticas com granulações variando de média a grosseira.	

Fonte: CPRM (2003) e IBAMA (1998).

As rochas do embasamento ocorrem de forma muito restrita em afloramentos na porção sudoeste da área, em um limite de exposição entre as rochas carbonáticas do Membro Pedro Leopoldo (Fm. Sete Lagoas) e as coberturas cenozóicas aluviais do Ribeirão da Mata.

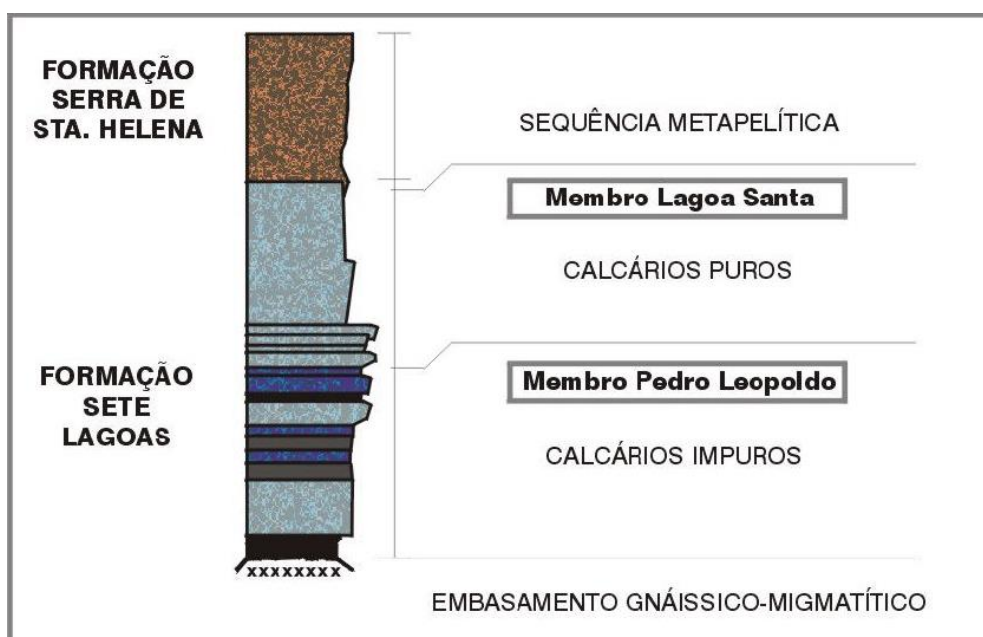
O Complexo Gnáissico Migmatítico (AGN-GR), pré-Cambriano, indiferenciado, compreende um conjunto ou associação de rochas gnáissicas, granitóides e migmatíticas de granulação fina a grosseira, com grandes teores de quartzo e feldspato porém pouca biotita. Padrões texturais e estruturais variam de rochas bandadas, fortemente foliadas a incipientes, e isotrópicas. Constituem o substrato mais antigo que serviu de base para a conseqüente formação da bacia do grupo Bambuí (IBAMA, 1998).

Sobrepõe-se ao embasamento a seqüência metassedimentar do Grupo Bambuí, de idade Neoproterozóica, que tem como representantes na área da APA, a Formação Sete Lagoas e a Formação Serra de Santa Helena (Figura 12), aflorantes no extremo sudeste da extensa bacia sedimentar pré-cambriana do Bambuí que integra o a porção sul do Cráton do São Francisco (Berbert-Born, 2002).

Grande parte do Grupo Bambuí em Minas Gerais depositou-se sobre uma área cratônica (estável), propiciando com isso a permanência horizontal ou subhorizontal de suas rochas sedimentares, com deformações referentes às faixas móveis ao Cráton São Francisco.

Como complemento da descrição geológica estrutural da região, é de fundamental importância o conhecimento da orientação das fraturas na região cárstica de Lagoa Santa para o entendimento do escoamento geral das águas, uma vez que, segundo Silva (2003), a princípio, a inclinação das camadas, aliada à posição das diaclases maiores, imprime um sentido preferencial para o escoamento das águas e ao surgimento de pontos privilegiados para o desaparecimento das águas. Ainda segundo Silva (2003), é possível inferir que a inclinação das camadas é mais forte e irregular nas proximidades do Ribeirão da Mata e menos acentuada e mais regular próximo ao Rio das Velhas.

Figura 12: Coluna litoestratigráfica sintetizada do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa



Fonte: Baseada em CPRM (2003); adaptada de Piló (1998), retirado de Meneses (2003).

A deposição das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas (PSBs) ocorreu em ambiente marinho, de mar epicontinental, raso, com declives pequenos, restringindo a circulação de água e provocando sua hipersalinização, em resposta a uma importante transgressão e regressão marinha. Para Nobre-Lopes (2002), a Fm. Sete Lagoas é composta por diversas sucessões em que cada unidade é depositada em águas cada vez mais rasas.

É a unidade de onde são extraídos os calcários para indústria cimenteira da grande Belo Horizonte, atividade econômica, por vezes, conflitante com a legislação ambiental e patrimonial relativa à proteção de cavidades - grutas e cavernas (Baeta, 2011). É composta por dois membros: Membro Pedro Leopoldo e Membro Lagoa Santa.

Os carbonatos mais finos e claros associados ao Membro Pedro Leopoldo foram formados por inundação marinha, das partes continentais mais baixas. Em seguida, a regressão marinha foi responsável pelo depósito de materiais mais grosseiros e escuros do membro Lagoa Santa sob águas rasas e alta energia, com alguma influência de sedimentação terrígena.

O Membro Pedro Leopoldo faz parte da sequência basal do Grupo Bambuí, e também da Formação Sete Lagoas, onde a participação clástica é mais acentuada especialmente no contato com embasamento cristalino. Representado por calcários mais impuros ou silicosos, finos e claros, com um teor de carbonato de cálcio sempre abaixo de 90% podendo chegar a 60% (Piló, 1998). Constituído de calcissiltitos e/ou microespátitos/espátitos, micritas, subordinadamente calcarenitos muito finos, margas, e milonitos protoderivados (IBAMA, 1998). O Membro Pedro Leopoldo (PSbspl) é exposto em 15,87% da área do Projeto, com ocorrência ao longo de toda a borda leste da área e porção sudoeste (SW).

O Membro Lagoa Santa (PSbsls) é sobreposto ao Membro Pedro Leopoldo, geralmente em contato brusco, através de falha de descolamento, com calcários mais puros, grosseiros e escuros, com teores de  $\text{CaCO}_3$  superior a 94%, que pode alcançar 200 metros de espessura (CPRM, 2003). Ocorre numa faixa de direção sudeste-noroeste (SE-NW) em aproximadamente 52,74% da área do projeto e é caracterizado pela presença de calcarenitos, com intercalações de calcissiltitos e calciruditos (IBAMA, 1998).

A Formação Serra de Santa Helena (NPbsh) ocorre como duas manchas nas regiões NE e SE da área (25%). É formada por rochas pelíticas de siltitos argilosos, arenitos subordinados, lentes carbonáticas correspondentes a margas e calcarenitos muito finos. Devido à sedimentação em águas calmas e profundas, resultado de uma transgressão, foi possível a constituição de estratos plano-paralelos, característicos dos seus metapelitos e metargilitos que se assentam, em contato brusco, ou gradacional concordante, sobre os calcários da Formação Sete Lagoas. Em alguns locais capeiam as rochas do embasamento gnáissico-migmatítico, e em outros, tectonicamente, os calcários do Membro Pedro Leopoldo.

Ocorrem localmente coberturas terciárias (Tdl) constituídas de terraços aluviais geralmente cobertos por solos diversos e/ou coberturas detríticas. Os sedimentos desses depósitos superficiais cenozóicos são muito diversificados quanto à sua textura, composição e distribuição, sendo formados por cascalho fino, areia, material siltico argiloso e seixos de quartzo. São decorrentes do intemperismo do ciclo erosivo (alteração e desagregação) causado pelas denudações de rochas mais antigas dos períodos Terciário e em menor escala, do Quaternário. Apresentam também terraços aluvionares anteriores aos aluviões recentes, responsáveis pela formação de grandes cascalheiras, em cotas mais elevadas e estratos contínuos, de espessuras irregulares. Outro tipo de terraço é sobreposto ao anterior composto por sedimentos areno argilosos com grânulos de quartzo. Suas áreas são muito utilizadas para agricultura e pastagem pois possuem boa fertilidade (IBAMA, 1998).

Os sedimentos quaternários (Qha) são representados por aluviões recentes encontradas nos fundos dos vales e planícies fluviais, em cordões alongados e contornos irregulares, referentes aos principais cursos d'água ainda ativos presentes na área como o ribeirão da Mata, córrego Jaguará, riacho da Gordura e Rio das Velhas. Os depósitos aluvionares foram formados ao longo dos cursos d'água ainda ativos no período Quaternário, enquanto os terraços aluviais, originados de antigos cursos abandonados e inativos, teriam sido depositados no período Terciário (IBAMA, 1998).

#### **4.5. Hidrogeologia**

Na região da APA Carste de Lagoa Santa predominam aquíferos cársticos livres a semi confinados desenvolvidos nas rochas pelítico-carbonáticas do Grupo Bambuí.

Os calcários do membro Lagoa Santa constituem o sistema de aquíferos carbonato-cársticos, que, devido à maior pureza das rochas dispõe também de maior concentração de calcita, o que favorece o processo de dissolução com aumento na concentração de sais na água, principalmente carbonato de cálcio, e, conseqüentemente, elevação na dureza e a alcalinidade que limita seus possíveis usos (Mourão *et al.* 2001). A facilitação do processo de dissolução é também agente de formação de feições cársticas em subsuperfície, às quais propiciam uma série de características peculiares quanto à transmissividade do aquífero.

O membro Pedro Leopoldo, representado por metassiltitos, filitos, calciofilitos, calcários silicosos cinza escuros, constitui os aquíferos cárstico-fissurais. Possui maior potencial hídrico nas porções tectonizadas, quando presentes, devido à permeabilidade secundária.

Os metapelitos da Formação Serra de Santa Helena possuem uma menor potencialidade aquífera, a qual é mais elevada em zonas de fraturas e em zonas de contato com a Formação Sete Lagoas.

A região endocárstica da APA é marcada pela presença de condutos de dissolução interligados e cavernas, enquanto o exocarste, exhibe dolinas, sumidouros, uvalas e surgências/ressurgências. A interação dessas feições com o sistema hídrico superficial potencializa a existência de grandes reservatórios subterrâneos.

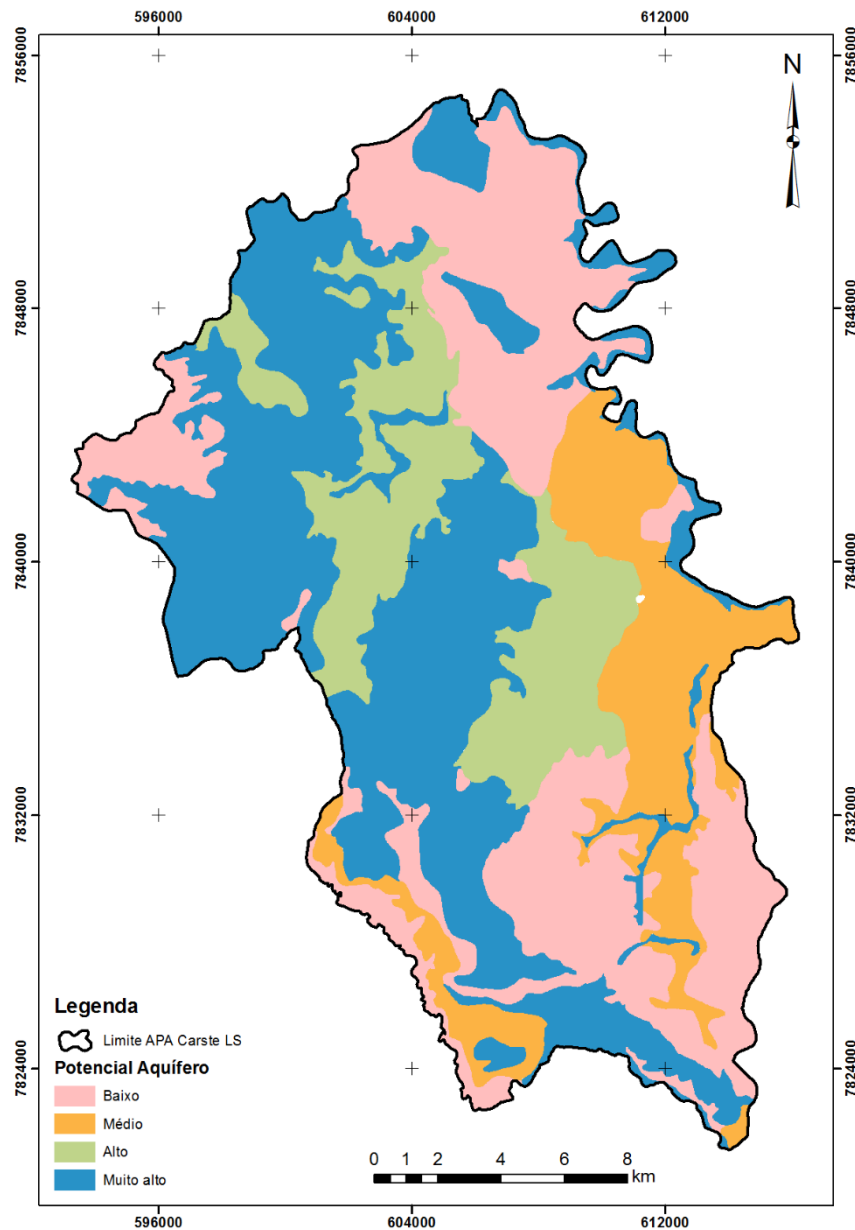
A APA tem uma reserva explorável de  $3,95m^3/s$  ou  $124,6 \times 10^6 m^3/ano$  (350 mm) e uma recarga da ordem de 27,6% em relação ao total pluviométrico médio da região, 1.270,1 mm (IBAMA, 1998).

Segundo IBAMA (1998), dos 96 poços catalogados no estudo do Projeto APA Carste Lagoa Santa, 60% estão localizados na Formação Sete Lagoas, os quais apresentam capacidade específica média de  $14,42 m^3/h/m$  para o membro Lagoa Santa e de  $2,78 m^3/h/m$  para o Membro Pedro Leopoldo. Grandes vazões são constatadas nas regiões de contato entre as Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena. A profundidade média desses poços é de 92 m, com mínima e máxima de 33 m e 170 m, respectivamente.

A potencialidade de um aquífero (Figura 13) está relacionada ao contexto morfológico e estrutural no qual está inserido, que é responsável pela quantidade de água explorada através de poços tubulares, sendo de vital importância o reconhecimento dessas relações para elucidar as principais questões referentes à circulação e ao armazenamento das águas subterrâneas.



Figura 13: Mapa de potencialidade aquífera para a APA Carste de Lagoa Santa.



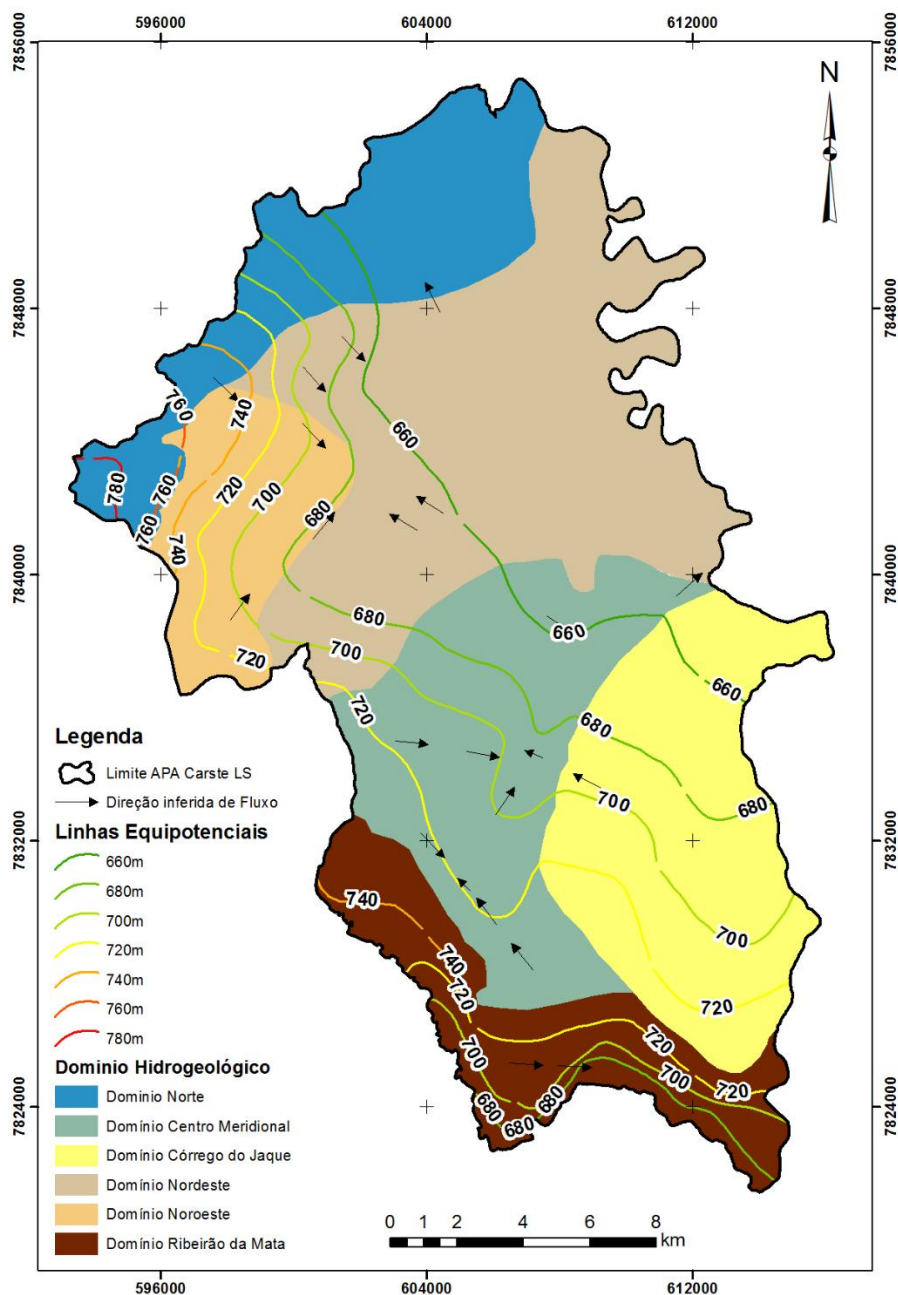
Fonte: Modificado de IBAMA (1998).

Considerando a relação entre vazão dos poços e controle morfoestrutural, observam-se maiores valores de vazão associados às feições cársticas do Membro Lagoa Santa, seguidos dos contatos geológicos entre as formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena (Figura 13). A região de Lagoa Santa, segundo Pessoa (2005), é abastecida por águas subterrâneas captadas dos mananciais aquíferos cársticos, por dezenas de poços tubulares. Esses aquíferos produzem grandes quantidades de água, o que reflete sua condição de excelente meio condutor e mantenedor de água subterrânea.

Em geral, o aquífero cárstico da área, apresenta águas de boa qualidade química, apesar da presença de locais restritos com parâmetros fora do padrão de potabilidade e sais de cálcio em solução, que conferem um sabor desagradável à água. A média de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) é de 197,4 mg/L e o pH médio de 7,5 (IBAMA, 1998).

No estudo APA Carste de Lagoa Santa os dados de perfis construtivo estratigráficos dos poços tubulares catalogados nos levantamentos hidrogeológicos do projeto VIDA foram organizados por IBAMA (1998), objetivando o reconhecimento da dinâmica das águas subterrâneas, através da elaboração do mapa potenciométrico (Figura 14), utilizando-se os parâmetros hidráulicos e altimétricos de 51 poços tubulares e informações adicionais de campo para determinação dos principais caminhamentos do fluxo subterrâneo, foi possível ainda a demarcação das áreas de recarga e descarga dos aquíferos. Além do mapa potenciométrico, a área foi subdividida em seis grandes domínios de bacias aquíferas (norte, noroeste, nordeste, centro-meridional, córrego do Jaque e ribeirão da Mata), sendo esses, categorizados e caracterizados em IBAMA (1998).

Figura 14: Mapa potenciométrico e das zonas aquíferas da APA Carste de Lagoa Santa.



Fonte: Modificado de IBAMA (1998).

#### 4.6. Solos

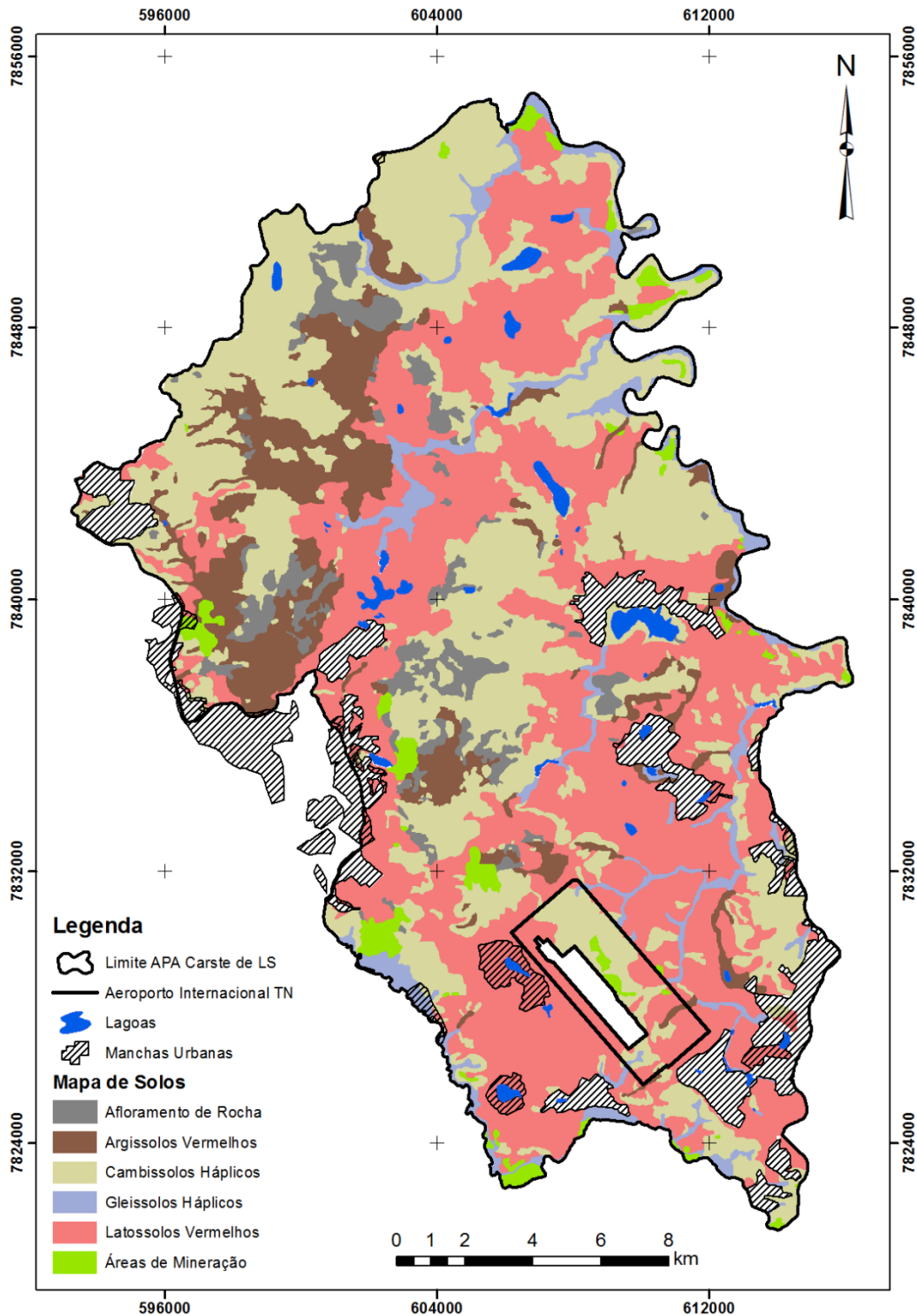
A classificação dos solos da APA Carste de Lagoa Santa realizada por IBAMA (1998) baseou-se nos “Critérios para distinção de classes de solos” (EMBRAPA, 1988) para a definição das classes de solos. Porém atualmente, já se conta com a terceira edição do manual do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2013). Para as análises do presente trabalho as corretas atualizações foram feitas correlacionando os dois sistemas até o segundo nível categórico de classificação de solos (Tabela 12). Encontram-se na área as seguintes tipologias de solo em ordem crescente de cobertura: Latossolos Vermelhos, Cambissolos háplicos, Argissolos Vermelhos e Gleissolos Háplicos (Figura 15).

Tabela 12: Mudanças de nomenclatura referentes aos solos encontrados na área.

Tipologia de solo	Embrapa (1998)	Embrapa (2013)	Cobertura na área (ha)
Solos com horizonte B latossólico	Latossolo Vermelho-Escuro – Le	Latossolos Vermelhos – LV	15.746,22
Solos com horizonte B incipiente	Cambissolo – Ca, Cl	Cambissolos háplicos – CX	13.505,39
Solos com horizonte B textural	Podzólico Vermelho-Escuro – PE	Argissolos Vermelhos - PV	3.808,50
Solos com horizonte Gleis	Glei Pouco Húmico – Hgp	Gleissolos Háplicos - GX	1.946,83

Fonte: EMBRAPA (1988) e EMBRAPA (2013).

Figura 15: Mapa de solos da APA Carste de Lagoa Santa.



Fonte: Adaptado de IBAMA (1998).

Os latossolos são solos formados por material muito alterado com Horizonte B latossólico e evolução muito avançada com atuação expressiva de processo de latolização (ferralitização ou laterização), resultando em intemperização intensa dos constituintes minerais primários, e, mesmo secundários menos resistentes, e concentração relativa de argilominerais resistentes e, ou, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, com inexpressiva mobilização ou migração de argila, ferrólise,

gleização ou plintitização. Enquadram-se como Latossolos Vermelhos solos com matiz 2,5YR ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, inclusive BA (EMBRAPA, 2013). Essa tipologia de solo recobre a maior parte da área, em três grandes faixas ao sul, extremo norte e centro, aproximadamente 15,7 mil ha, ou, 45%.

As áreas ocupadas por latossolos têm uma boa aptidão agrícola, para agricultura com manejo desenvolvido ou semidesenvolvido, por seu excelente conjunto de características físicas, todavia, com deficiência em fertilidade natural, porém facilmente corrigido, pode apresentar pobreza em nutrientes e teor elevado de acidez potencial.

A segunda tipologia de solo mais encontrada na área é a dos Cambissolos, terminologia evoluída de “*Cambiare*”, do italiano, trocar ou mudar (tradução livre). É um agrupamento de solos pouco desenvolvidos com horizonte B incipiente que apresenta pedogênese pouco avançada evidenciada pelo desenvolvimento da estrutura do solo com a alteração do material de origem, expressa pela quase ausência da estrutura da rocha ou da estratificação dos sedimentos; com matizes mais vermelhos ou conteúdo de argila mais elevados que os horizontes subjacentes. Ocorrem como cambissolos háplicos quando não são caracterizados como hísticos, húmicos ou flúvicos (EMBRAPA, 2013). Na área ocorrem em três grandes faixas, que recobrem grande parte da área, com 13,5 mil ha (38,6%).

Os Argissolos tendem a ser mais férteis que os outros solos do Cerrado, ocupando 15% da área desse bioma (UFLA, 2014). Estes solos desenvolvem-se a partir de diversos materiais de origem, em áreas de relevo plano a montanhoso e têm como característica principal a presença de um horizonte B textural (Bt). A mobilização de argila da parte mais superficial do solo, com concentração ou acumulação em horizonte subsuperficial (EMBRAPA, 2006) faz o horizonte superficial ser muitas vezes arenoso, e mesmo em relevo suave ondulado, pode apresentar limitação agrícola devido ao risco de erosão, portanto, práticas de conservação de solos são recomendáveis.

São considerados argissolos vermelhos quando apresentam matiz 2,5 YR ou mais vermelho ou com matiz 5YR e valores e cromas iguais ou menores que 4, na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA, 2013). Ocorrem em maior proporção nas regiões Noroeste e centro este da área, entre os Latossolos e os Cambissolos com aproximadamente 3,8 mil ha de área de cobertura (10,9%).

Em menor escala, os gleissolos háplicos correspondem as calhas dos cursos d`água e lagoas, em uma cobertura de aproximadamente 1,9 mil ha, ou (5,5%). São solos localizados próximos as drenagens em baixadas de relevo plano, em áreas de várzeas normalmente com vegetação de vereda, campos hidrófilos, que na maioria das vezes permitem o acúmulo de água durante todo o ano, ou na maior parte dele. O lençol freático quase sempre está próximo à superfície. Suas características são

influenciadas pela contribuição de partículas provenientes dos solos das posições mais altas e da água de drenagem, uma vez que são formados em áreas de recepção ou trânsito de produtos transportados. É resultante de processos de intensa redução de compostos de ferro, em presença de matéria orgânica, com ou sem alternância de oxidação, por efeito de flutuação de nível do lençol freático, em condições de regime de excesso de umidade permanente ou periódico (EMBRAPA, 2006). Os gleissolos háplicos são solos que não se enquadram em nenhuma das outras classes de classificação do segundo nível categórico do SiBCS, sejam elas: Gleissolos tiomórficos, Gleissolos sálicos e Gleissolos melânicos (EMBRAPA, 2013).

#### 4.7. Cobertura Vegetal

O primeiro estudo detalhado da vegetação na área de Lagoa Santa foi feito pelo botânico dinamarquês Eugen Warming, que publicou sua obra, “*Lagoa Santa – Contribuição para a Geographia Phytobiológica*”, em 1908, contendo, além da vegetação, descrição de solos, clima e uso dos recursos naturais pela população local. Warming define a vegetação da área como uma composição de matas, formações de brejo, plantas aquáticas, campestres e os cerrados (IBAMA, 1998).

A região da APA, segundo a classificação de Ab’Saber (1977), se enquadra no domínio morfoclimático do Cerrado, que apresenta uma flora arcaica composta de cerradões, cerrados e campestres, com ocorrência nos chapadões centrais brasileiros e campos gerais, onde imperam climas tropicais úmidos a duas estações.

Para Rizzini (1979), na APA Carste de Lagoa Santa observa-se um “mosaico” vegetacional admitindo como clímaces, o cerradão, o campo sujo e a floresta pluvial e como disclímaces, o cerrado e a mata degradada. As principais classes de vegetação, segundo os mapas de uso da terra elaborados por IBAMA (1998), na área da APA, são descritas na Tabela 13.

Tabela 13: Principais classes de vegetação com ocorrência na APA Carste de Lagoa Santa.

Tipologia	Descrição
Cerrado	Paisagem composta por árvores tortuosas, de cascas grossas, interrompidas por uma ou outra árvore de porte mais ereto e emergente.
Campo Cerrado	Possui composição florística quase idêntica à do cerrado ( <i>sensu stricto</i> ), porém a cobertura vegetal é bem mais baixa
Campo	Formação constituída predominantemente por gramíneas, leguminosas rasteiras e ciperáceas. Utilizados geralmente como pastagem natural.

Zona de transição mata/ cerrado	Nessa área, as espécies de cerrado, mata seca e mata pluvial mesclam-se de tal forma que se torna impossível delimitá-las.
Mata Seca	Segundo Rizzini (1979) essa mata está sujeita a um ritmo estacional que se traduz por avançado grau de decíduidade foliar durante a seca.
Mata Seca sobre rochas calcárias	Tipo especial de mata seca que ocorre em solos rasos, sobre afloramentos de calcário
Mata Pluvial	Formação arbórea perenifólia contendo elementos da Mata Atlântica e da Hiléia Amazônica
Mata ciliar ou de galeria	Matas perenifólias encontradas ao longo dos cursos d'água, misturadas em grande porcentagem com árvores decíduas (Carvalho, 1995).
Pasto	As gramíneas mais usadas são a braquiária, o capim gordura e o jaraguá.
Pasto sujo	Ocupa áreas de campo cerrado, cerrado em regeneração e áreas ocupadas pelo pasto semeado com gramíneas que foram invadidas por espécies de campo.
Área cultivada	Ocupa preferencialmente antigas áreas de mata ciliar e de cerrado

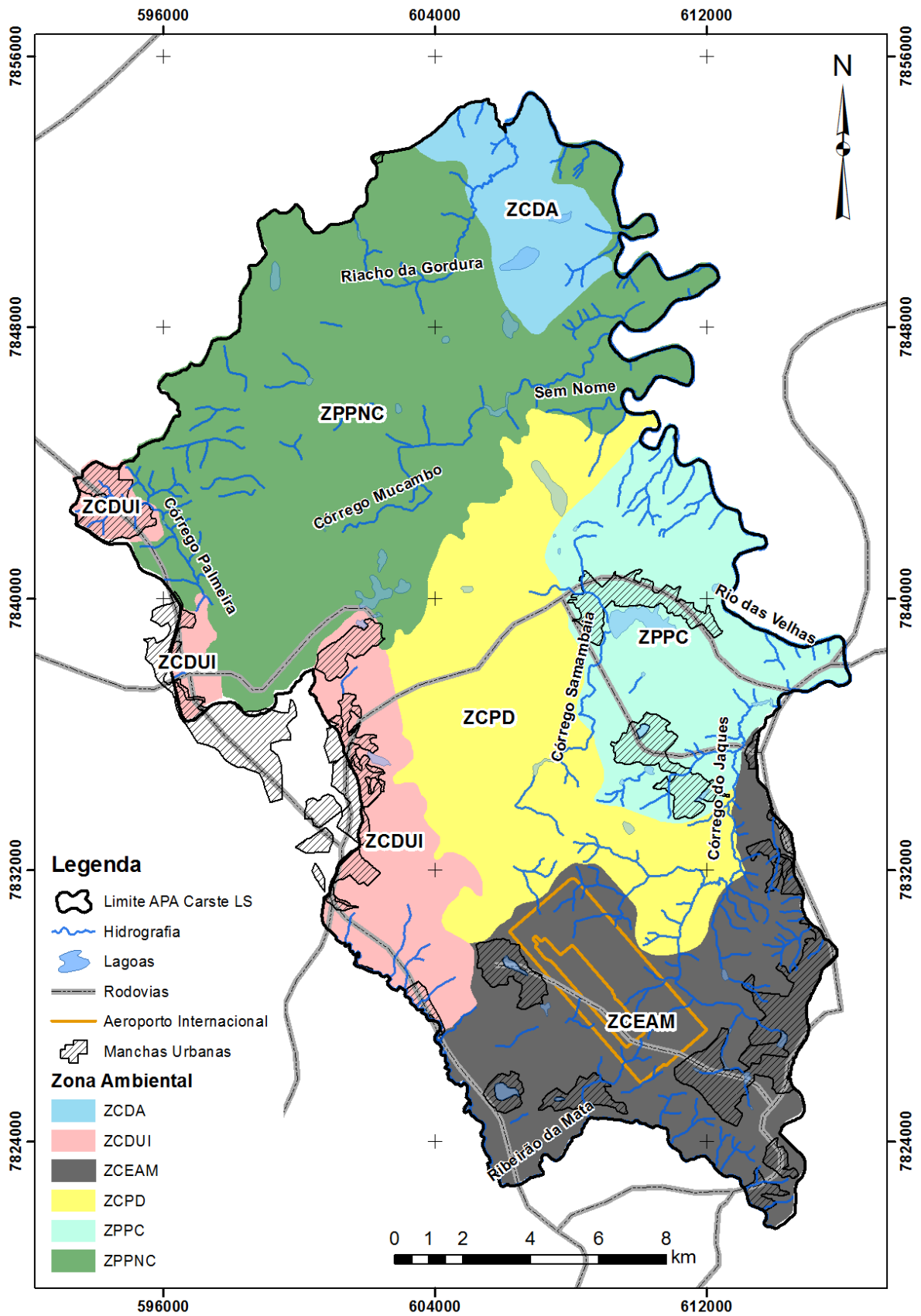
Fonte: IBAMA (1998).

#### 4.8. Zoneamento Ambiental e Uso do Solo

O Zoneamento Ambiental da APA Carste Lagoa Santa (Figura 16) foi instituído pelo IBAMA, por meio da instrução normativa 01/97, dividindo-a em distintas partes levando em consideração a geomorfologia, a ocupação já estabelecida e as peculiaridades de cada área, podendo ser definidas nos seguintes itens:

- ZCEAM – Zona de Conservação do Equilíbrio Ambiental Metropolitano;
- ZCDUI – Zona de Conservação e Desenvolvimento urbano e Industrial;
- ZCDA – Zona de Conservação e Desenvolvimento Agrícola;
- ZCPD – Zona de Conservação do Planalto das Dolinas;
- ZPPC – Zona de Proteção do Patrimônio Cultural;
- ZPPNC – Zona de Proteção das Paisagens Naturais do Carste.

Figura 16: Zoneamento Ambiental da APA Carste de Lagoa Santa.



Fonte: Modificado de IBAMA (1998).



A tabela abaixo mostra um resumo do Zoneamento Ambiental e as funções de cada zona:

Tabela 14: Zonas Ambientais da APA Carste e suas funções.

	Zonas Ambientais	Funções
Zona conservação	Conservação do Equilíbrio Ambiental Metropolitano – ZCEAM	Propiciar o equilíbrio entre a proteção do sistema cárstico e os grandes vetores metropolitanos de Vespasiano, Pedro Leopoldo, Matozinhos e Lagoa Santa, minimizando os impactos dessa expansão urbana sobre as áreas de maior fragilidade da APA.
	Conservação e Desenvolvimento Urbano e Industrial – ZCDUI	Disciplinar o corredor de urbanização e industrialização ao longo da MG-424, limitando a sua penetração nas áreas frágeis do Planalto das Dolinas bem como evitar o impacto desse corredor sobre as áreas remanescentes das matas decíduais e semidecíduais.
	Conservação e Desenvolvimento agrícola – ZCDA	Estabelecer padrões tecnológicos para produção agropecuária visando racionalizar a utilização dos recursos naturais.
	Conservação do Planalto das Dolinas – ZCPD	Disciplinar a ocupação do Planalto das Dolinas por atividades agropecuárias e extração mineral.
Zona Proteção	Proteção das Paisagens Naturais do Carste – ZPPNC	Proteger os recursos ambientais e a sua biodiversidade para a integridade dos ecossistemas representativos das paisagens e da biota associados as matas decíduais e semidecíduais da APA.
	Proteção do Patrimônio Cultural – ZPPC	Proteger o conjunto paisagístico e a cultura regional, representados pelos sítios arqueológicos e paleontológicos do Sistema Ambiental do Sumidouro, pelo Sítio Arqueológico da Lapinha e pelo patrimônio histórico de Fidalgo.

Fonte: Instrução normativa IBAMA no 1/97 IBAMA (1997) e IBAMA (1998).

Três áreas consideradas de destaque serão detalhadas a seguir para o melhor entendimento da situação sócio ambiental da APA: a Zona de Conservação do Planalto das Dolinas (ZCDP), Zona de Proteção das Paisagens Naturais do Carste (ZPPNC) e Zona de proteção do patrimônio cultural – ZPPC, sendo as duas últimas mais restritivas (proteção), e a primeira de conservação.

A zona classificada como Zona de Conservação do Planalto das Dolinas (ZCDP) apresenta significativas feições do sistema cárstico, de relevo ondulado, com vertentes de baixa a moderada declividade e concentrações de ocorrências espeleológicas e arqueopaleontológicas. Essa zona

apresenta uma relação de permeabilidade de alta a muito alta dos aquíferos. A presença de ocupação agrícola e agropecuária acontece nas regiões próximas a Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, vale ressaltar que loteamentos, indústrias, agricultura, silvicultura, pecuária e mineração são possíveis dentro da zona com condicionantes para a preservação do ambiente.

A chamada Zona de Proteção das Paisagens Naturais do Carste (ZPPNC) engloba cerca de 30% da zona de recarga do aquífero cárstico, representada por uma região de maciços de calcário puro, áreas cársticas com alta permeabilidade e com baixo grau de alteração antrópica. Apresenta também áreas não cársticas com relevo montanhoso e vertentes com declividade alta e terrenos de baixa resistência. Algumas feições clássicas do carste podem ser encontradas como *poljes* e uvalas, além dos acervos arqueológicos, espeleológicos e paleontológicos. Apesar da maior restritividade atribuída a essa área assentamentos urbanos, atividades agrosilvopastoris, industriais e atividades de extração mineral já existentes podem continuar operando com condicionantes específicas.

A Zona de proteção do patrimônio cultural – ZPPC, abriga importantes sítios arqueo paleontológicos/turísticos no conjunto da gruta da Lapinha e elementos da paisagem cárstica, como a Lagoa do Sumidouro e o *Polje* do Sumidouro, além de apresentar um contexto de conjuntos culturais, como Fidalgo/Quintas do Sumidouro e Casa Fernão Dias, referências da histórica e cultura.

Dentro dos limites dessa zona a disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos e de mineração, como as atividades de extração de cascalho no rio das Velhas e extração de pedra Lagoa Santa, e a expansão desordenada de loteamentos, e de área para recreio, culminam em uma competição pelo uso da água, assoreamento e poluição dos mananciais e impacto ao patrimônio espeológico, arqueológico, cultural e paisagístico.

De uma forma geral, as maiores interferências econômicas na APA Carste Lagoa Santa, acontecem na extração, principalmente, de calcário, da indústria do cimento e do Aeroporto de Confins. Os usos mais impactantes do solo observados na área relacionadas por IBAMA (1998), são:

- Atividades de mineração com o beneficiamento de calcário, que implicam em impactos significativos ao sistema cárstico e ao patrimônio espeleológico;
- Disposição inadequada de resíduos sólidos e rejeitos de mineração de extração de calcário;
- Desmatamento por usos intensivos do solo como agricultura, pecuária e a expansão dos vetores urbanos, resultando em poucos remanescentes das formações vegetais, que recobrem maciços calcários, vertentes acidentadas e planícies fluviais;
- Disposição e lançamento de efluentes no solo provenientes de criadouros diversos como de gado leiteiro, cavalos de raça, suínos e aves;
- Agricultura intensiva e irrigada com utilização de fertilizantes e pesticidas, e em alguns casos técnicas inadequadas de plantio;

- Utilização inadequada de dolinas como áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos;
- Lançamento de efluentes industriais de atividades existentes na área, a exemplo da indústria têxtil, de fundição e de cimentos;
- Núcleos urbanos sem infraestrutura de saneamento, com crescimento desordenado sobre áreas de cerrado e terrenos cársticos.

Todas essas atividades podem ocasionar impactos nas zonas aquíferas, tendo em vista que a fragilidade do meio aquífero em contato com o ambiente antrópico, sem o devido estudo, pode resultar em alterações na qualidade natural da água.

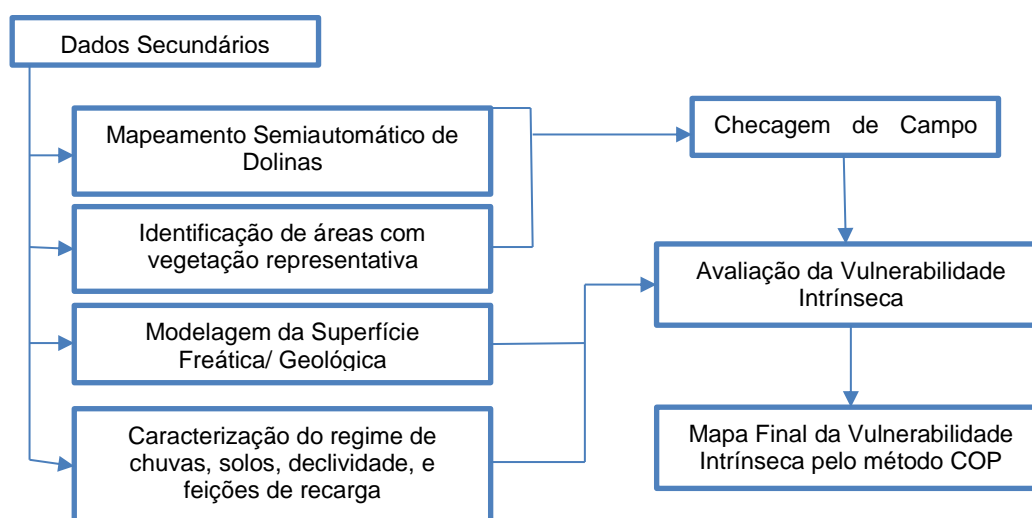
Além disso, bombeamentos excessivos podem ocorrer resultando em um rebaixamento do lençol e conseqüente risco de subsidência do terreno e pequenos abalos sísmicos, podendo afetar a população.

## 5. MÉTODOS APLICADOS

Apresentam-se nesse item os métodos de estudo aplicados e o processamento preliminar das bases georreferenciadas para a obtenção das variáveis de entrada necessárias na aplicação do método de vulnerabilidade intrínseca, levando em consideração a intensiva busca bibliográfica apresentada anteriormente.

O fluxograma apresentado na Figura 17, demonstra a cronologia dos métodos aplicados até o resultado final.

Figura 17: Fluxograma dos métodos aplicados.



### 5.1. Método COP

Nos conceitos básicos apresentados na “*European Approach COST Action 620*” (Zwahlen, 2003), três aspectos são descritos para a determinação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos:

- Tempo de transporte advectivo do ponto de origem até o aquífero considerado;
- Atenuação física (i.e. dispersão, diluição);
- Quantidade relativa de contaminantes que podem atingir o aquífero (incluindo a porção dos contaminantes que nunca chegarão ao alvo por deixar o sistema por escoamento superficial).

O método COP foi divulgado na Ação Européia *Cost Action 620* (Zwahlen, 2003) e desenvolvido pelo *Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga - GHUMA* (Vías *et al.* 2002), apoiado pelo *Instituto Geológico y Minero de España (IGME)*. Inicialmente os fatores C, O, P foram testados em dois aquíferos carbonáticos, nas regiões de Líbar e de Torremolinos, situados no sul da Espanha. Ambos apresentaram diferentes características intrínsecas e extrínsecas, climatológicas, hidrogeológicas e geológicas (litologia, tectonismo e geomorfologia), e já haviam sido submetidos a investigações avaliadas pelos métodos PI e EPIK (Vías *et al.* 2002) permitindo uma comparação entre os métodos. O método foi também aplicado em países da África, Cuba, China,

Eslovênia, Alemanha, França, Itália e Portugal. Regiões específicas podem ser citadas, como: *Podstenjšek*, situado no sudeste da Eslovênia (Ravbar, 2007), *The Cradle of Humankind World Heritage Site*, nordeste da África do sul (Leyland, 2008), e Bacia do Irecê, nordeste do Brasil (Nossa, 2011). Segundo Vías *et al.* (2002) dentre as metodologias utilizadas para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos (i.e. PI e EPIK), a metodologia COP forneceu uma maior diferenciação nas classes obtidas, sendo, portanto, ainda segundo Vías *et al.* (2002), a metodologia mais eficaz para a determinação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos considerados.

O método COP é um anacronismo derivado das iniciais dos três fatores de vulnerabilidade considerados: concentração de fluxo (C), camadas sobrepostas (O) e precipitação (P), onde para cada um é gerado um mapa. Assume que o transporte do contaminante depende predominantemente da capacidade da água em se mover até o aquífero por meio da infiltração pela superfície em feições que possam culminar em recarga.

### 5.1.1. Fator C – Concentração de Fluxo

O mapa da concentração de fluxo (C) representa o grau em que a precipitação se concentra em áreas de recarga com subsequente “*bypassing*” de contaminantes através das camadas de proteção (*overlying layers*). Leva em consideração as condições da superfície que controlam o fluxo superficial até as zonas de infiltração rápida, como declividade e vegetação e a hidrologia. É avaliado a partir da suposição de dois cenários:

- Cenário 1 – para a área de recarga do aquífero cárstico onde a infiltração é concentrada e o fluxo penetra pela zona não saturada por meio da ação de feições cársticas. Neste caso, quatro elementos são considerados: i) influência da declividade ( $s$ ); ii) influência da vegetação ( $v$ ); iii) a distância das feições cársticas de recarga direta ( $dh$ ); iv) distância dos cursos d’água associados a sumidouros - vales cegos ( $ds$ ). As variáveis declividade e vegetação são correlacionadas: quando a declividade aumenta, a vegetação tende a diminuir, aumentando a vulnerabilidade.
- Cenário 2 – para o restante da área onde a infiltração ocorre de maneira difusa, e, nesse caso, é considerado a combinação de três variáveis: feições superficiais ( $sf$ ), vegetação ( $v$ ) e declividade ( $s$ ).

O parâmetro C se dá então pelas equações a seguir, alimentadas pelos dados obtidos em cada cenário:

- Cenário 1

$$C = sv \times dh$$

$$C = sv \times ds$$

Onde, C = Concentração de Fluxo;

sv = Declividade e Vegetação;

dh = Distância de feições cársticas de recarga;

ds = Distância de cursos d'água associados a sumidouros.

- Cenário 2

$$C = sf \times sv$$

Onde, sf = Feições superficiais.

O mapa do Fator C (concentração de fluxo) é gerado pela superposição dos mapas resultantes dos cenários 1 e 2. Os valores finais são derivados dos maiores valores de vulnerabilidade de cada cenário.

### 5.1.2. Fator O – Camadas Sobrepostas

O mapa das camadas sobrepostas (O), comumente considerado como um dos atributos mais importantes na avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas, se refere à capacidade de proteção natural da zona não saturada de um aquífero de filtrar ou atenuar a contaminação por diversos tipos de processos, e conseqüentemente, reduzir os efeitos adversos de contaminantes. É representado pela zona biologicamente ativa do solo e pelas características litológicas das formações rochosas que ocorrem entre a superfície do terreno e o nível da superfície freática; logo, são levados em consideração duas variáveis: o solo (*Os*) e a litologia (*OL*). Para os solos (*Os*) são considerados parâmetros como textura, espessura e distribuição do tamanho dos grãos. A variável *OL* é quantificada pelos tipos de rochas e grau de faturamento (*ly*), que determinarão as características hidrogeológicas; espessura de cada camada (*m*), e as condições de confinamento (*cn*) do aquífero.

Para a geração do mapa das camadas sobrepostas é feita a somatória dos valores relacionados a cada fator que será o valor de proteção do mapa "O". É frequentemente o fator mais importante na determinação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero à contaminação (Leyland, 2008). Quanto menor o valor do fator (O) maior será a vulnerabilidade intrínseca sendo associado a áreas onde o solo é pouco desenvolvido ou ausente.

$$O_L = \sum [ly \times m] \times cn$$

Onde, OL = Subfator Litologia;

Ly = Litologia e Fraturamento;

$m$  = Espessura da Camada;

$cn$  = Condições de Confinamento.

$$O = [O_S] + [O_L]$$

Onde,  $O$  = Fator Camadas Sobrepostas;

$O_S$  = Subfator Solo;

$O_L$  = Subfator Litologia.

### 5.1.3. Fator P – Precipitação

O parâmetro precipitação ( $P$ ) é gerado pela soma dos parâmetros relacionados à quantidade ( $P_q$ ) e intensidade ( $P_i$ ) das precipitações, que interferem no transporte de agentes na zona não saturada por infiltração, sendo que o escoamento superficial tende a crescer com o aumento da intensidade e a duração da precipitação e com a área abrangida pela mesma.

O regime de precipitações deve ser considerado em uma escala regional (Zwahlen, 2003), por médias anuais e também a frequência, duração e intensidade de eventos extremos que têm influência no tipo e quantidade de infiltração.

$$P = [P_Q] + [P_I]$$

Onde,  $P$  = Fator Precipitação

$P_q$  = Subfator precipitação

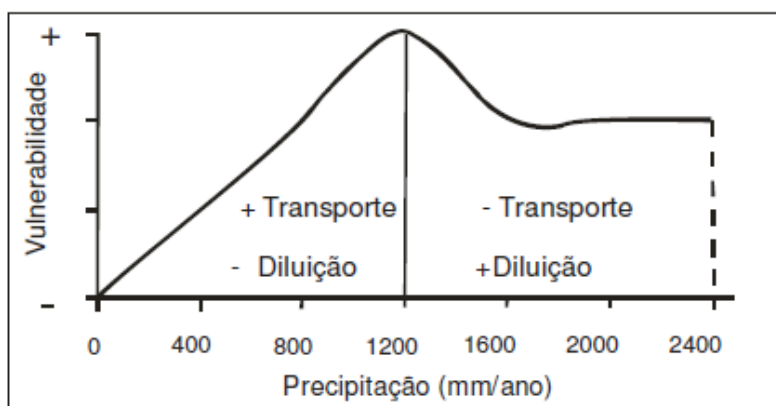
$P_i$  = Subfator intensidade da precipitação

O subfator  $P_q$  corresponde às séries históricas das médias anuais de chuvas dos anos considerados úmidos pelo método, definidos como anos em que os valores de precipitação atingem 15% acima da média anual ( $\bar{x} + 0,15\bar{x}$ ) onde o nível piezométrico está mais elevado devido à maior carga de chuvas, portanto mais próximo à superfície, sendo mais vulnerável nesses períodos.

O subfator  $P_i$  é calculado pela razão entre a média anual de precipitação dos anos considerados úmidos e a média dos dias com ocorrência de chuvas. Altas intensidades provocam maiores recargas e conseqüentemente uma redução da proteção (Ravbar, 2007).

Os autores do método (Vías *et al.* 2002; Vías *et al.* 2006) acreditam que os processos de transporte são, dependendo da intensidade da chuva, mais importantes do que os de dissolução, assim, a variação da vulnerabilidade em função do transporte e dissolução ocasionados pela precipitação segue o padrão mostrado no Gráfico 2.

Gráfico 2: Influência da precipitação na vulnerabilidade de aquíferos, pelos agentes de transporte e diluição, de acordo com a Metodologia COP.



Fonte: Vías *et al.* (2002), Vías *et al.* (2006) citado por Nossa (2011).

Correlacionando-se os fatores pode-se dizer que os fatores C (Concentração de Fluxo) e O (Camadas Sobrepostas) representam as características internas do sistema, enquanto o fator P (Precipitação) representa um stress externo aplicado ao sistema. Os fatores C e P são utilizados como modificadores para a correção do grau de proteção providenciado pelo fator O (Leyland, 2008). Os fatores O e P podem ser utilizados para avaliar a vulnerabilidade de qualquer tipo de aquífero enquanto o fator C é específico para aquíferos cársticos (Vías *et al.* 2002).

Para obter o índice de vulnerabilidade final da área os três fatores (C,O,P) são multiplicados e classificados em 5 classes em um mapa temático, onde os extremos variam entre muito baixo até muito alto, com valores entre 1 e 15 (Tabela 15). As classes mais altas, ou mais vulneráveis, dependem principalmente da influência do fator C. As classes muito baixas referem-se a zonas em que os fatores C e P têm pouca influência na proteção.

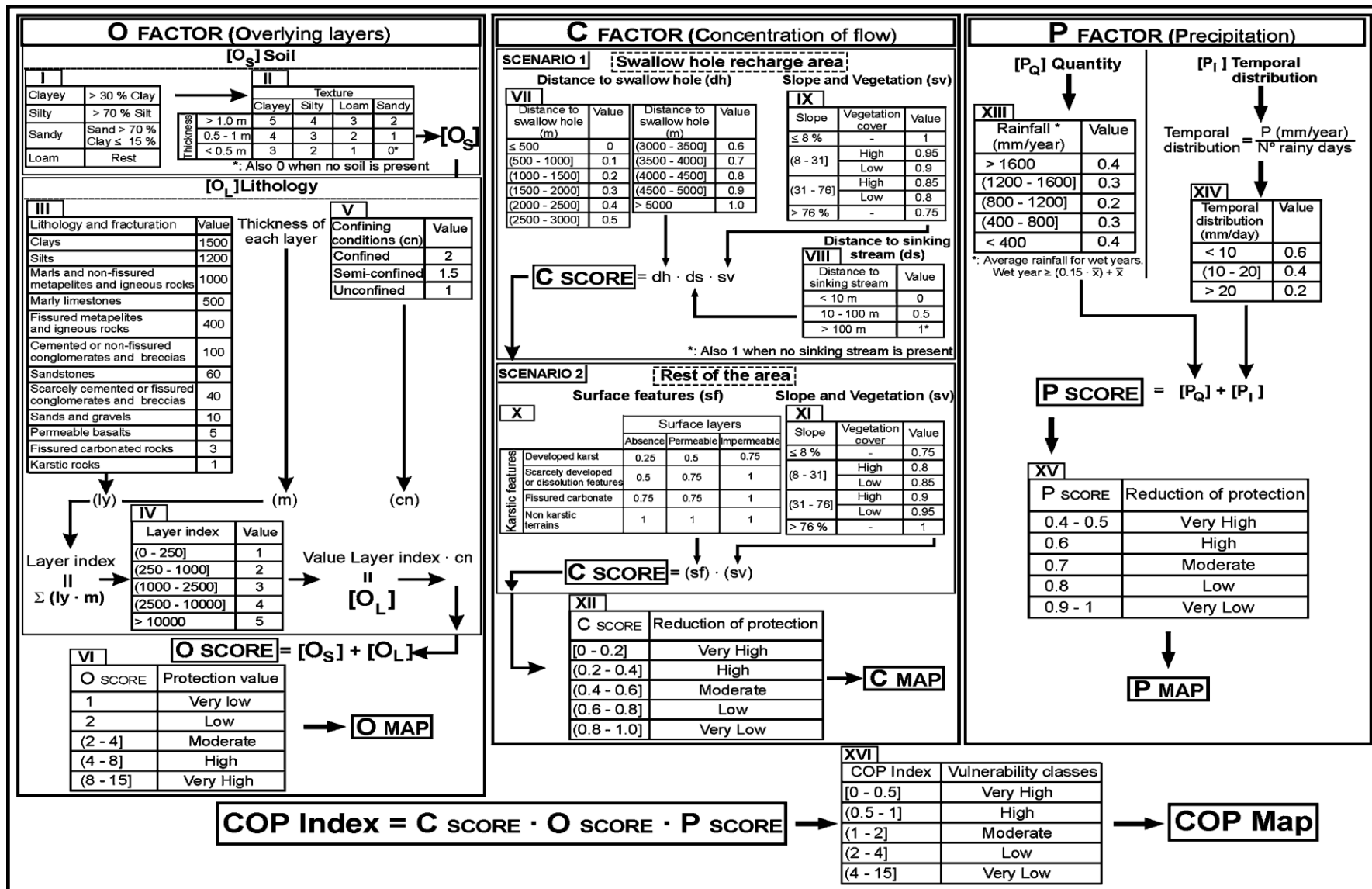
Tabela 15: Síntese dos valores finais dos principais fatores do método COP, e do índice final COP.

Mapa da vulnerabilidade Final		Mapa subfator C Redução da Proteção		Mapa subfator O Valor de Proteção		Mapa subfator P Redução da Proteção	
Descrição	Fator COP	Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
Muito Alto	0 - 0,5	Muito Alta	0 – 0,2	Muito Baixo	1	Muito Alta	0,4 – 0,5
Alto	0,5 - 1	Alta	0,2 – 0,4	Baixo	2	Alta	0,6
Moderado	1 - 2	Moderada	0,4 – 0,6	Moderado	2 – 4	Moderada	0,7
Baixo	2 - 4	Baixa	0,6 – 0,8	Alto	4 – 8	Baixa	0,8
Muito Baixo	4 - 15	Muito Baixa	0,8 – 1	Muito Alto	8 – 15	Muito Baixa	0,9 - 1

Fonte: Modificado de Vías *et al.* (2002).



Figura 18: Fluxograma geral de aplicação para o método de avaliação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos cársticos – COP



Fonte: Vías et al. (2002).

## 5.2. Mapeamento Semiautomático de Dolinas

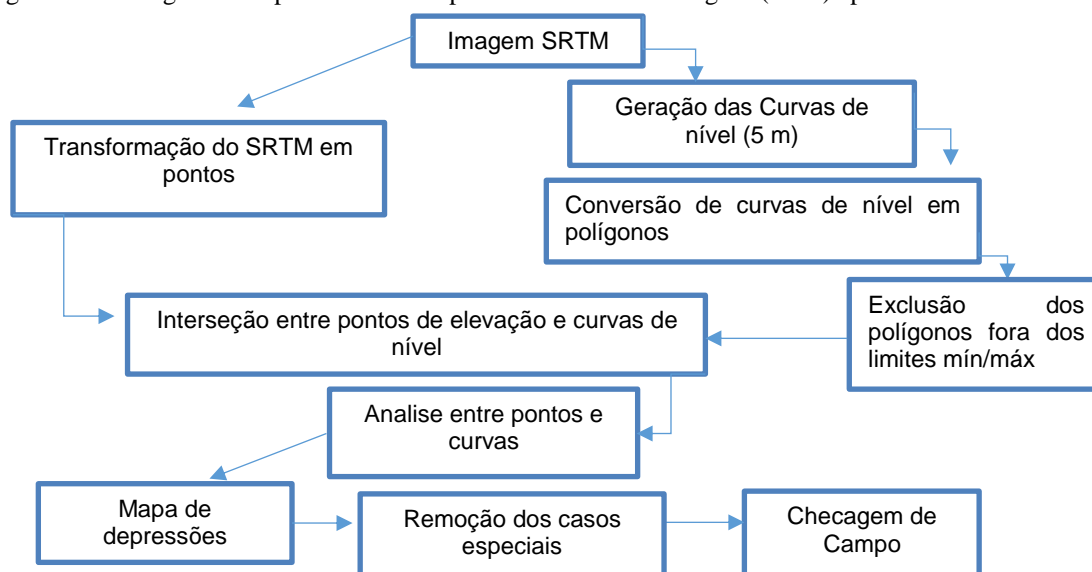
As dolinas são importantes estruturas fechadas no relevo, resultantes de zonas de dissolução máxima dos carbonatos definidas por Christofolletti (1980), como depressões calcárias de largura e profundidade variadas, com contornos sinuosos e de geometria circular ou oval. As dolinas são classificadas como de abatimento, em que há um forte controle estrutural na sua formação, ou de dissolução, em que predomina a solubilidade das rochas. A coalescência de duas ou mais dolinas gera a uvala, que se destaca por apresentar forma alongada.

Nos aquíferos cársticos, as zonas de recarga do tipo localizada são principalmente condicionadas por feições de absorção como dolinas e sumidouros, podendo estes estar associados à evolução de dolinas. A recarga do tipo difusa ocorre em áreas de afloramento das rochas carbonáticas, e em locais onde há drenança, a partir dos aquíferos granulares sobrepostos (Mourão *et al.* 2001). O preenchimento das áreas dolinizadas com aterros e outros dejetos, podem inviabilizar o processo de recarga do aquífero, mascarando o terreno para a construção civil, causando impactos geotécnicos (IBAMA, 1998).

Segundo Lladó (1970) as formas cársticas de absorção podem ser classificadas em abertas (sumidouros) e fechadas (dolinas, uvalas, poljes e vales cegos). As formas abertas permitem uma penetração rápida e livre da água para o interior do sistema. Já as formas fechadas apresentam uma absorção lenta da água.

Para a identificação das depressões, e subsequentemente análise das feições que se enquadram como dolinas, foi empregada uma simplificação do método de autoria de Rodrigues (2011) adicionado à remoção manual e interpretativa de ruídos, cujos procedimentos de geoprocessamento empregam modelos digitais de elevação, análises das curvas topográficas, pontos individuais de altitude e cálculo analítico entre cenas. A Figura 19 ilustra o fluxograma simplificado das etapas executadas.

Figura 19: Fluxograma simplificado das etapas do método de Rodrigues (2011) aplicadas neste estudo.



Primeiramente, os dados de altitude foram refinados pelo processamento da imagem SRTM através do método de interpolação linear *Spline* (método de interpolação que considera as tendências laterais para os cálculos), que possibilitou um melhoramento da resolução da imagem original com pixels de 30x30 metros para pixels de 10x10 metros. Dessa nova imagem foram extraídas curvas de nível utilizando a ferramenta *Contour* do *ArctoolBox* (ArcGIS).

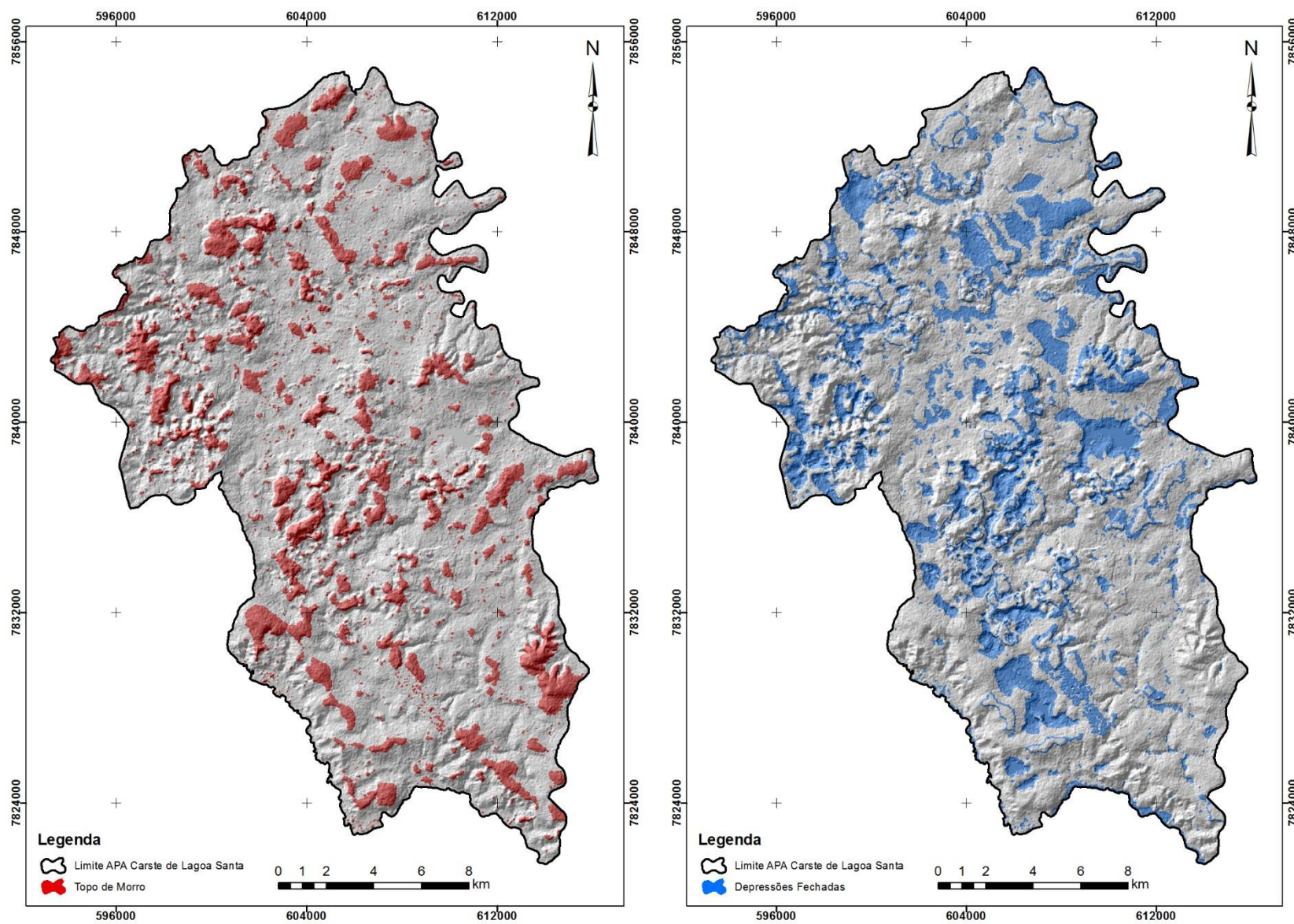
Para se obter uma maior aproximação das feições reais de depressão, as curvas foram geradas com espaçamento de 5 metros e convertidas em polígonos para que somente aquelas linhas inteiramente fechadas na abrangência de toda área de estudo pudessem ser exportadas. Consequentemente, as curvas que não se enquadraram nessas condições foram excluídas do processo já que representam a impossibilidade de serem depressões fechadas.

As feições de tamanho muito reduzido, assim como as extremamente grandes foram consideradas como ruídos do processo, podendo ser produtos de problemas relacionados à interpolação, e foram excluídas do processo automaticamente com a adoção de uma área mínima. Um limite de área máxima de cobertura para as feições mapeadas foi estabelecido. Para isso foi aplicado um filtro ao mapa de depressões com limites mínimo e máximo para essas feições. Em relação a área mínima, foi adotado um limite inicial igual a 500m<sup>2</sup>, mais do que suficiente para a escala do presente trabalho, após a filtragem dos dados a menor feição identificada apresentou área de 515m<sup>2</sup>. Quanto a área máxima, observou-se a presença de *outliers* principalmente nas bordas da imagem. Foi assumido como área máxima a maior depressão identificada dentro dos limites da área, a depressão da Lagoa do Sumidouro com 4,67km<sup>2</sup>.

Em outra etapa foram extraídos todos os pontos de elevação da malha que formam o Modelo Digital de Elevação (MDE), e, em uma análise conjunta gerou-se uma interseção entre polígonos e os pontos de altitude da imagem SRTM refinada.

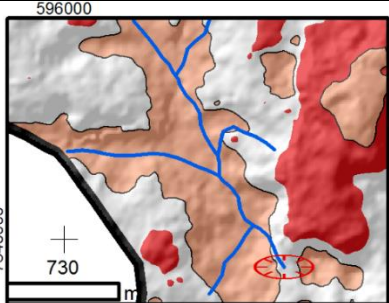
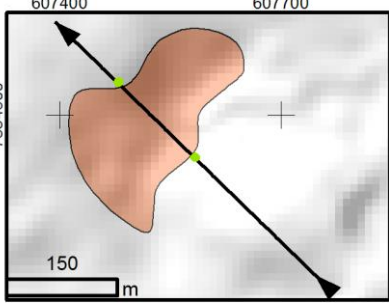
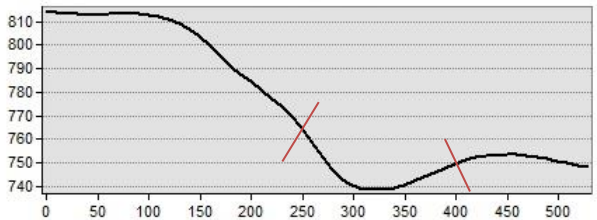
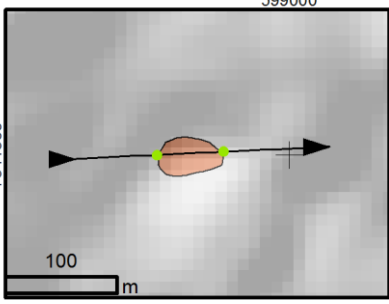
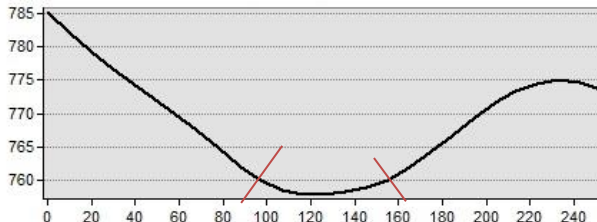
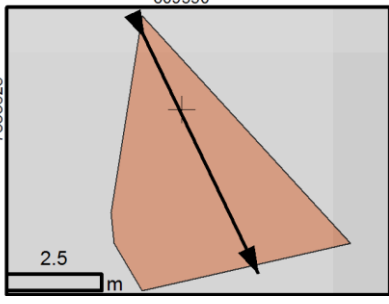
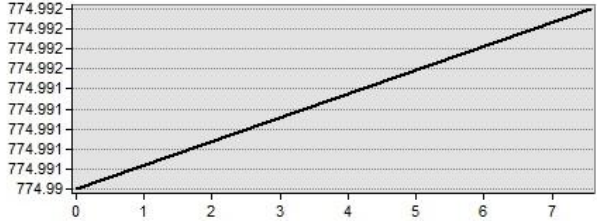
A seguir subtraem-se as elevações dos pontos do SRTM das cotas das curvas envolventes resultando em um novo campo com duas categorias: números positivos e negativos, onde, os resultados com valores positivos indicam depressões, e valores negativos, altos topográficos. A análise desses atributos resultou no mapa preliminar dos topos de morro e depressões (Figura 20).

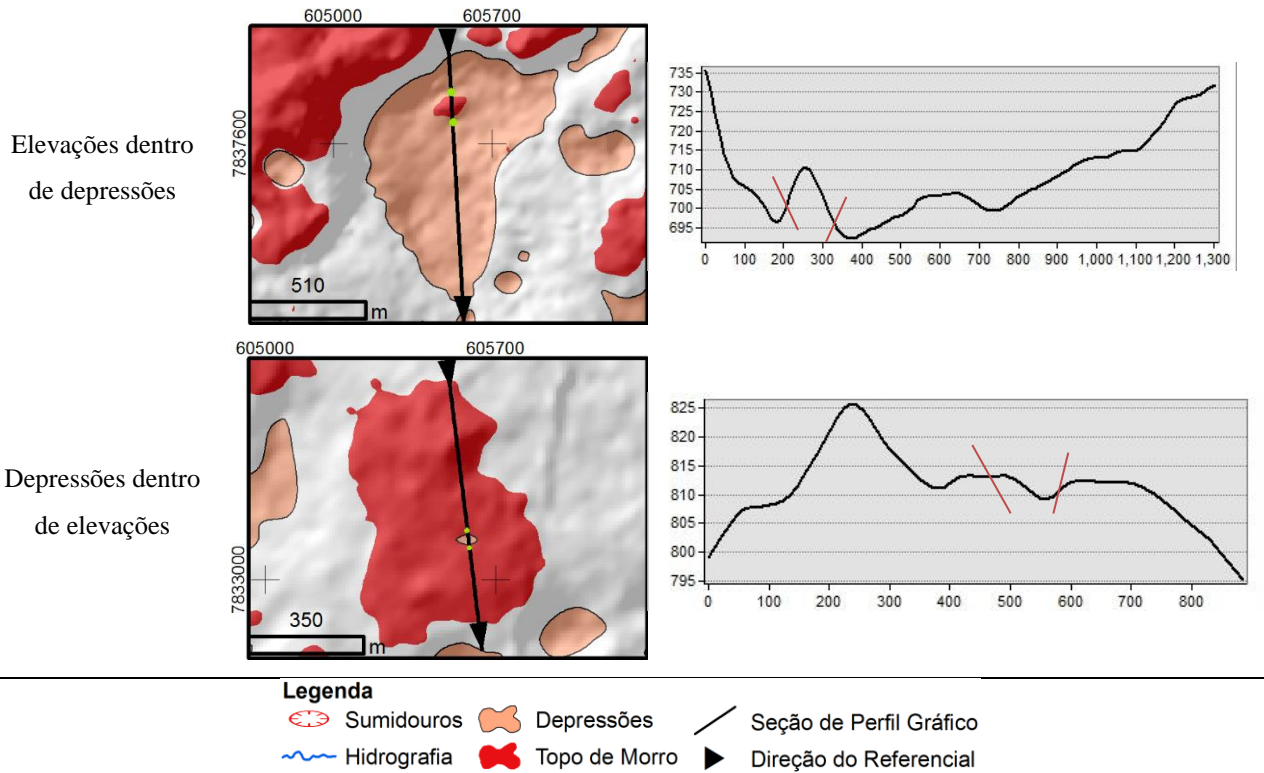
Figura 20: Mapa de topos de morro (esq.) e depressões (dir.) sem filtros pelo método semiautomático.



Durante a interpretação do mapa preliminar de depressões fechadas, na busca de possíveis dolinas, foram observadas alguns casos especiais (Tabela 16) como: a associação das planícies de inundação de alguns cursos d'água (e.g. Rio das Velhas, Ribeirão da Mata, Córrego da Samambaia), um subdimensionamento/ não identificação de feições em áreas de cobertura florestal, feições de tamanho muito reduzido, elevações dentro de depressões e depressões dentro de elevações.

Tabela 16: Casos especiais identificados na interpretação preliminar do mapa de depressões.

Caso Identificado	Exemplo	Perfil Gráfico
Associação das planícies de inundação		-
Sub dimensionamento/ não identificação de feições em pontos cegos		
Sub dimensionamento de feições em áreas de cobertura florestal		
Feições de tamanho muito reduzido e outliers		



As feições geradas identificadas como calha de rios foram removidas do processo utilizando como critério a análise visual caso a caso.

O subdimensionamento de feições em pontos cegos se deve à distância entre as curvas de nível adotadas para essa rotina, já que as bordas de algumas feições podem estar dentro do intervalo mínimo de curvas considerado (pontos cegos). Uma solução para esse problema seria o refino ainda maior da imagem com um espaçamento mais reduzido das curvas de nível, porém esse nível de detalhamento não entra no escopo do presente trabalho. A influência da vegetação no subdimensionamento de feições também foi bastante importante e se deve principalmente ao método de captura da imagem SRTM onde se utiliza da interferometria de radar. A técnica interferométrica está sujeita a um grande número de fatores físicos que podem comprometer o realismo do produto obtido. Por exemplo, em áreas com cobertura florestal, a altura do dossel aparece como elevação. Nos casos de depressões identificadas sob esse regime, os sinais de micro-ondas enviados pelo sensor podem ter sofrido perturbação causada por esses dosséis florestais antes de atingir o solo à reflexão, assim, a identificação das feições morfológicas podem ser mascaradas pela vegetação. Para o mapa final de possíveis dolinas as feições subdimensionadas foram utilizadas sem qualquer outro tipo de tratamento (não houve posterior exclusão dessas feições).

Os casos de elevações dentro de depressões e depressões dentro de elevações foram tratados na etapa seguinte onde analisou-se por amostragem os casos de prováveis dolinas, sendo mantidos aqueles que cumpriram os requisitos básicos para esse enquadramento.

Em algumas localidades detectaram-se grupos de pequenas dolinas situadas dentro de depressões maiores. Nesses casos foram consideradas as formas maiores.

Após a remoção das feições consideradas ruídos, foi feita uma análise exploratória manual caso a caso por amostragem aleatória e, dentro do grupo das depressões, foram analisados os casos de prováveis dolinas, utilizando como base de controle a hidrografia, a topografia (gráficos de perfil) e imagens de satélite (*Google Earth Pro*) culminando no mapa final de dolinas gerado via SRTM (Figura 21).

Em campo foram buscadas, aleatoriamente, dolinas distribuídas ao longo da área sem levar em consideração o mapa gerado via SRTM. Os pontos amostrados e as informações básicas coletadas podem ser consultados no Apêndice I. Os resultados do mapeamento via SRTM foram comparados com os dados de campo e concluiu-se que as dolinas identificadas *in situ* foram também detectadas pelo método de identificação de depressões. Em uma análise ponto a ponto constatou-se o reconhecimento de 100% das localidades visitadas em campo (23 pontos) pelo método adotado. A Figura 22 ilustra algumas das dolinas visitadas em campo.



Figura 21: Mapa final de dolinas pelo método semiautomático de identificação de depressões.

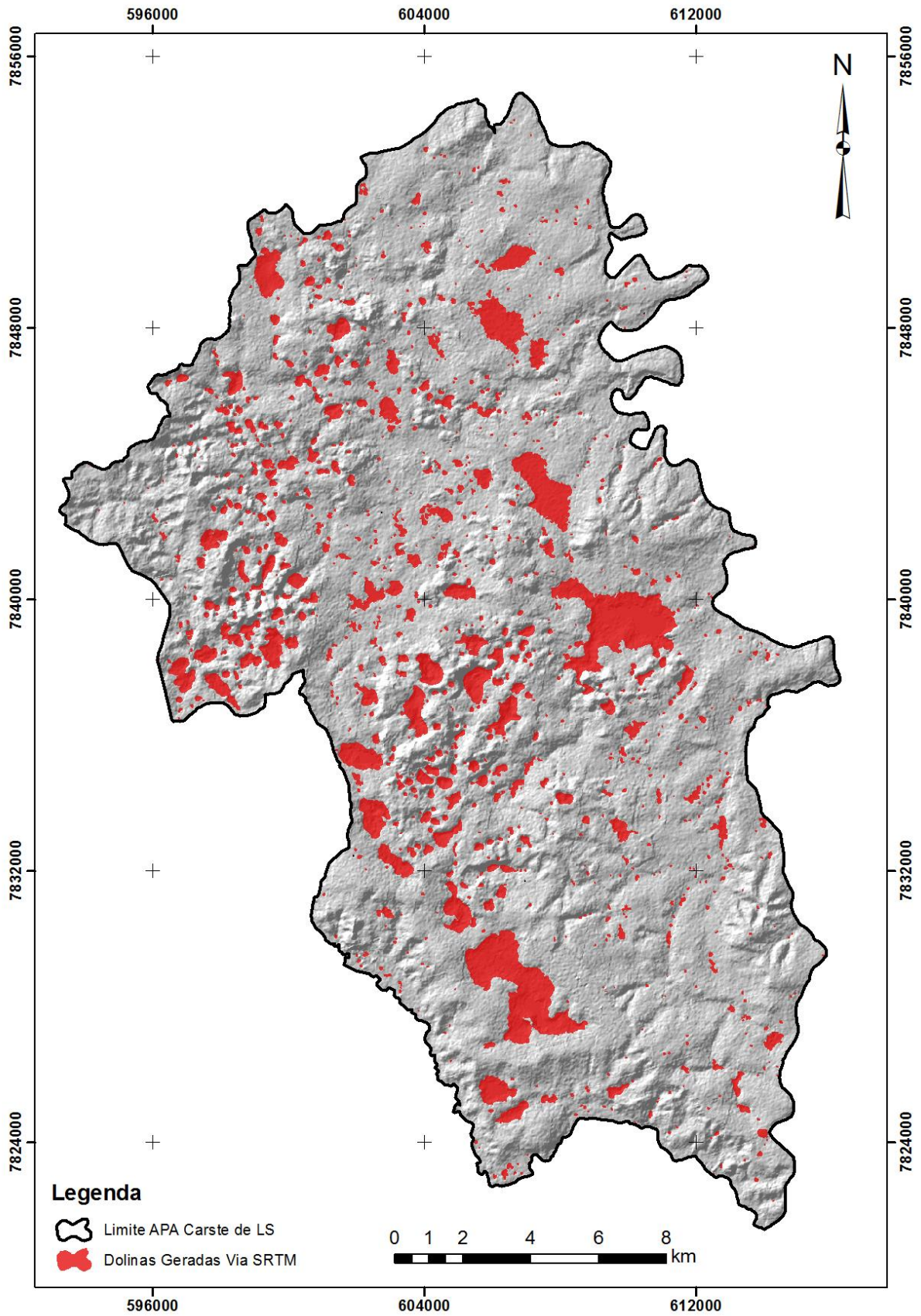
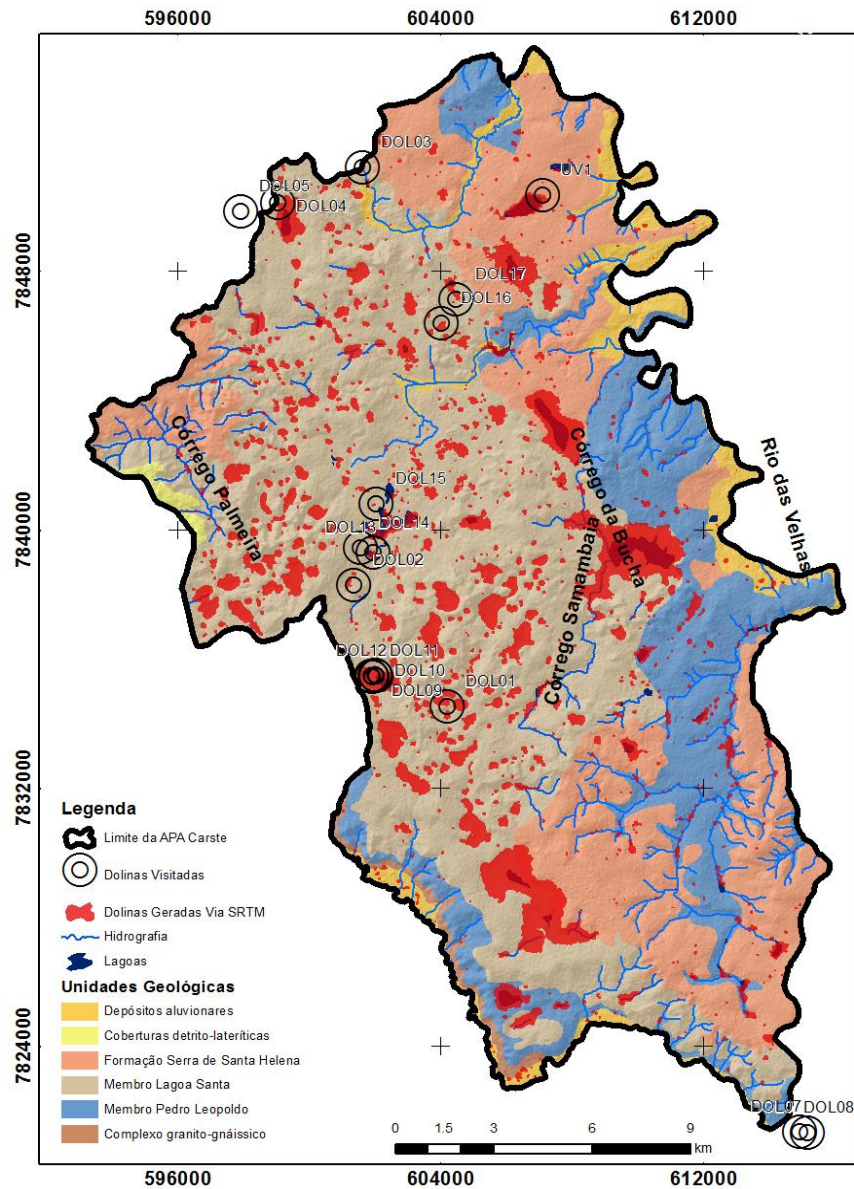


Figura 22: Mapa geológico e de depressões geradas via SRTM com pontos visitados em campo (esq.). A direita fotos demonstrativas.



Dolina (ponto DOL11) preenchida com água e urbanização no entorno



Dolina (ponto DOL13) com áreas de pasto e loteamentos



Dolina (ponto DOL17) pouco vegetada próxima a estrada de terra



Uvala (ponto UV1)



O deslocamento máximo de um ponto visitado em campo para uma depressão mapeada via SRTM foi de aproximadamente 96 metros, valor que não desqualifica a validação parcial, visto a dificuldade de se apontar visualmente as bordas dessas feições *in situ* quando a declividade é muito baixa, além de certas condições adversas limitantes encontradas em campo, como, por exemplo, a dificuldade de acesso ou obtenção de autorização de entrada em propriedades particulares ou mesmo diferença de precisões horizontais entre SRTM e realidade.

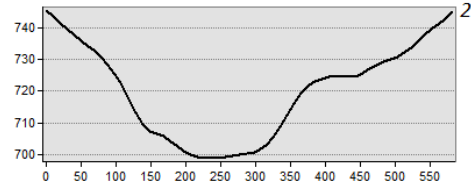
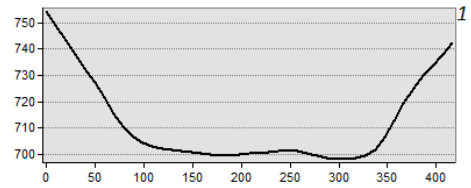
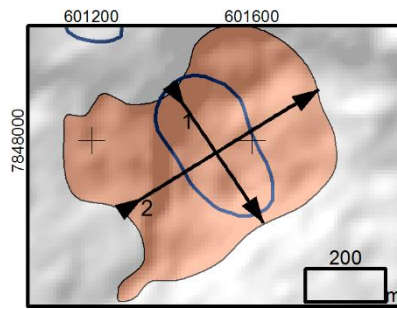
Posterior à etapa de campo e confirmação de algumas feições identificadas, foram feitas apreciações comparativas entre o mapa de depressões gerado via SRTM e o mapeamento realizado por IBAMA (1998) para dolinas. A metodologia utilizada por IBAMA (1998) para o mapeamento de dolinas em escala 1:50.000 foi a de identificação por fotografias aéreas, pela análise das curvas de nível disponíveis para a região (Cartas topográficas: Lagoa Santa e Pedro Leopoldo em escala 1:50.000; e cartas topográficas Baldim e Sete lagoas em escala 1:100.000), e confirmação por campanhas de campo.

A verificação comparativa foi feita manualmente através de uma inspeção dos mapas postos em sobreposição na busca de possíveis casos singulares. Os casos especiais identificados estão especificados na Tabela 17.

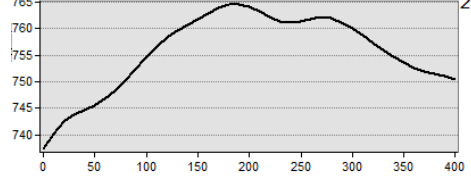
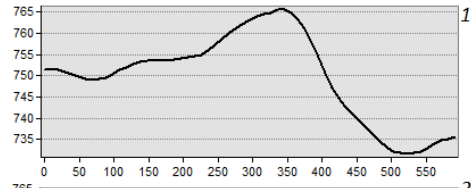
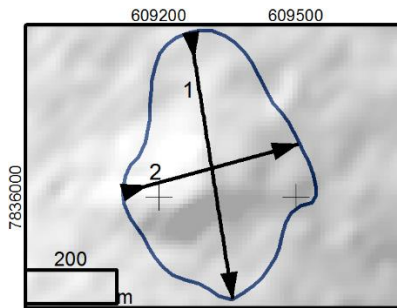
Tabela 17: Casos especiais identificados na comparação entre dolinas mapeadas por IBAMA (1998) e método utilizado.

Caso identificado	Exemplo	Perfil gráfico
IBAMA (1998) identificou feições maiores do que o método*		

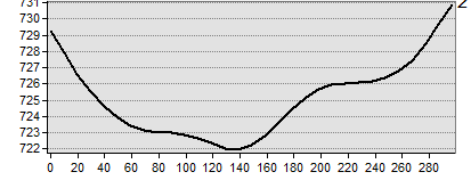
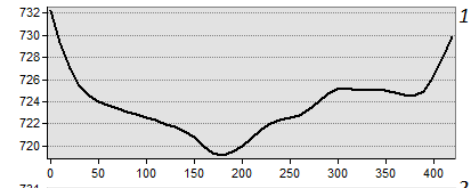
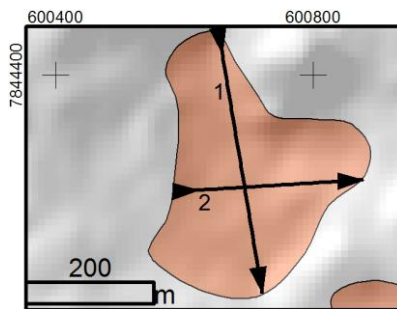
IBAMA (1998)  
identificou  
feições menores  
do que o  
método\*



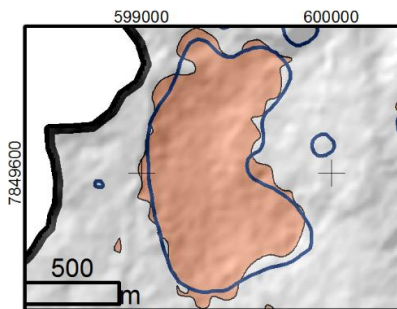
Falso positivo  
identificado por  
IBAMA (1998)



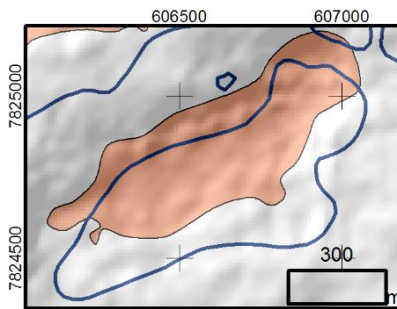
Método\*  
identificou onde  
IBAMA (1998)  
não



Método\* e  
IBAMA (1998)  
mapearam  
feições  
próximas



Feições entre  
Método\* e  
IBAMA (1998)  
deslocadas



\*identificação semiautomática de depressões via SRTM para espaçamento vertical das curvas de nível de 5m.

Dos casos especiais identificados nessa etapa a expressiva maioria foi consequência da objetividade do método semiautomático e o refino da imagem SRTM em relação à subjetividade do método adotado por IBAMA (1998) onde a base topográfica utilizada foi menos detalhada além da dificuldade em se traçarem visualmente as bordas das depressões quando a declividade se torna muito suave. Essa disparidade pode ser exemplificada nos seguintes casos observados: IBAMA (1998) identificou feições maiores do que o método; IBAMA (1998) identificou feições menores do que o método; Método identificou onde IBAMA (1998), não, e método e IBAMA (1998) estão próximos porém deslocados.

No caso da identificação de feições maiores do que por IBAMA (1998) alguns desses limites sugeriram depressões que funcionariam como anfiteatro de bacia hidrográfica e não representariam depressões fechadas. Nas outras situações a diferença dos mapeamentos pode ser associada às próprias metodologias e às bases de dados utilizadas.

Os casos identificados como falsos positivos via IBAMA (1998) tiveram sua verificação através de perfis gráficos de elevação e são importantes pontos para checagem em campo de consistência das feições mapeadas, assim como todos os outros casos especiais identificados.

Foram, ainda, utilizadas duas formas de análise de comparação entre as depressões geradas e as dolinas mapeadas por IBAMA (1998), sendo elas: i) por meio do índice de circularidade; ii) pela interseção entre os dois mapas para avaliação do grau de superposição entre eles.

O índice de circularidade ( $Ic$ ) é um recurso matemático para se compreender a semelhança entre uma feição e um círculo de raio equivalente. Seus valores variam entre 0 e 1. Quanto mais circular a forma do fragmento, menor a borda e maior é a área. Portanto, o valor de  $Ic$  tende a aumentar à medida que a feição se aproxima da forma circular e diminui à medida que a feição se torna alongada, logo, feições com índices de circularidade muito baixos tendem a não suprir as condições necessárias para a classificação como dolinas. O índice de circularidade é calculado através da seguinte fórmula (Borges *et al.* 2004):

$$IC = \frac{AP}{AC}$$

Onde, IC = Índice de circularidade;

AP = Área do polígono;

AC = Área do círculo de perímetro equivalente.

$$AC = \pi \times RC^2$$

Onde, RC é o raio desse círculo, equivalente ao perímetro (P) dividido por duas vezes  $\pi$ .

$$RC = \frac{P}{2 \times \pi}$$

Os índices de circularidade foram calculados para ambos os mapas de dolinas levando em consideração as equações apresentadas e todas as amostras dos dois grupos, partindo de uma área mínima de dolina igual a menor dolina mapeada por IBAMA (1998).

As informações estatísticas básicas são apresentadas na Tabela 18, e, para uma análise descritiva foram gerados histogramas de distribuição de frequências das duas amostras (Gráfico 3 e Gráfico 4).

Tabela 18: Índices de circularidade das feições mapeadas

Mapa Considerado	Índice de Circularidade					
	Número de Amostras Considerado	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	Mediana
Identificação via SRTM	1018	0,7979	0,9976	0,1700	0,1838	0,8729
IBAMA (1998)	574	0,8327	0,9862	0,3051	0,1259	0,8661

Gráfico 3: Histograma de frequências dos índices de circularidade via fotointerpretação IBAMA (1998).

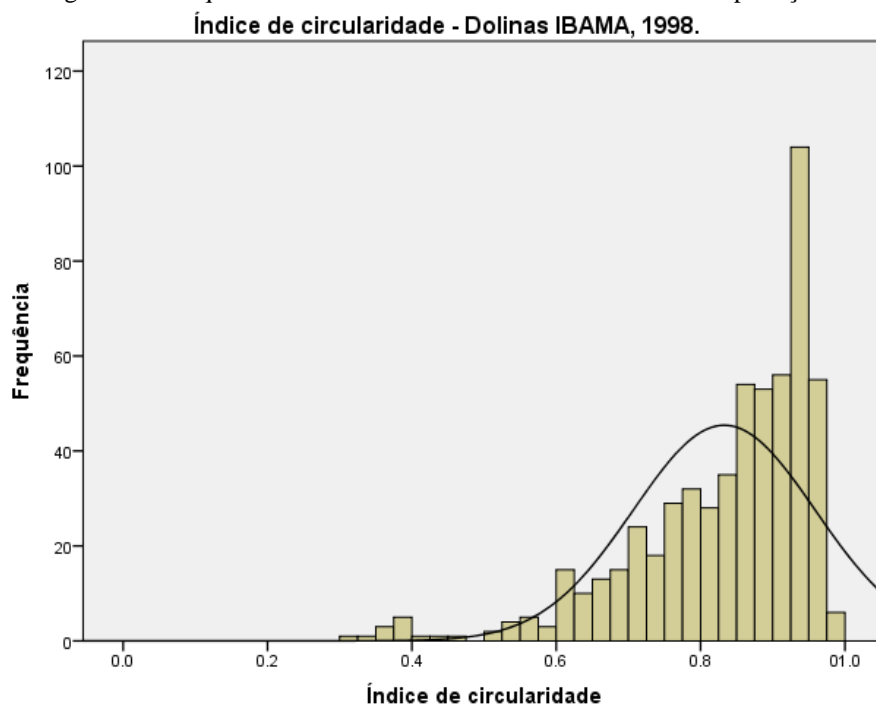
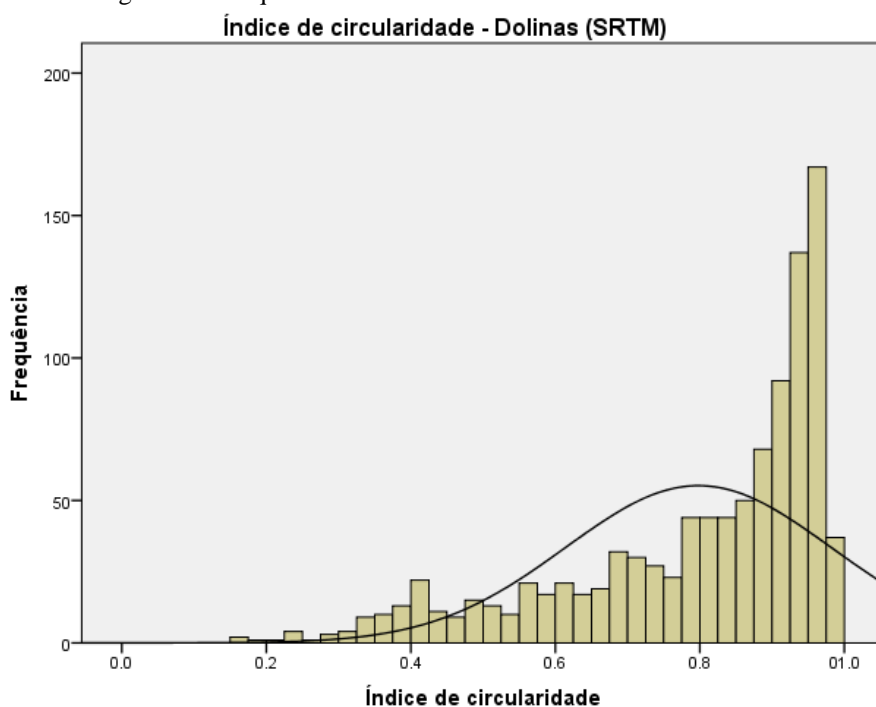


Gráfico 4: Histograma de frequências dos índices de circularidade via método semiautomático



O número de amostras foi 43,6% maior no método semiautomático via SRTM. Essa diferença pode ser justificada pela influência do refinamento da malha de cotas topográficas, proporcionando um maior detalhamento do terreno, permitindo inclusive a identificação de bordas de baixa declividade. Apesar do número de dolinas detectadas entre os métodos ser muito díspar, os valores estatísticos médio (apenas 4,4% de diferença), máximo e mediano do índice de circularidade, são muito próximos nos dois grupos. O desvio padrão é 31,5% maior no grupo do método semiautomático, provavelmente devido ao maior número de dados.

Para uma comparação cartográfica entre os dois métodos, foram gerados mapas de superposição, e de interseção, conforme o mapa da Figura 23, e na Tabela 19.

Figura 23: Mapa de dolinas mapeada por IBAMA (1998) sobreposto a mapa de depressões geradas nesse trabalho (esq.), e mapa da interseção entre os dois mapas (dir.).

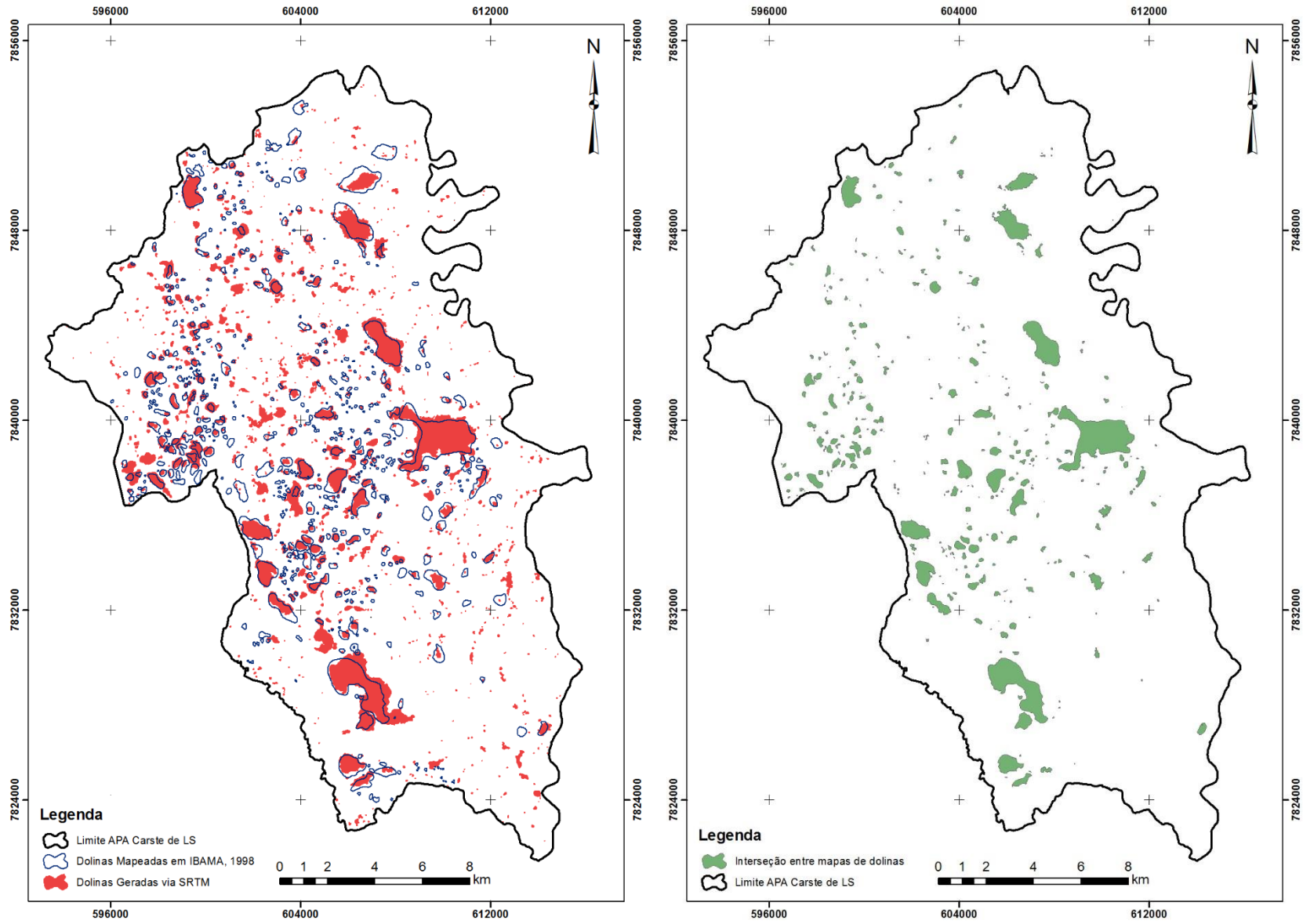




Tabela 19: Relação entre áreas de interseção entre os dois mapas

Mapa Considerado	Número de Amostras Considerado	Área Total das feições	Área de Interseção	Número total de Amostras sobrepostas	% de área de interseção em relação a IBAMA (1998)	% de amostras sobrepostas
Identificação via SRTM	1018	3.846 ha	2.069 ha	349	55%	61%
IBAMA (1998)	574	3.740 ha				

Os resultados da interseção dos mapas indicaram um número total de amostras sobrepostas de 349, isto é, as feições geradas no método semiautomático interceptaram em pelo menos um ponto 61% das feições previamente mapeadas. A área de interseção entre os dois mapas foi de 2.069 ha, o que significa que 55% da área mapeada por IBAMA (1998) foi também mapeada pelo método semiautomático.

Levando em consideração a diferença do tamanho amostral, a área total e a área de interseção pode-se inferir a ocorrência de uma maior distribuição espacial das dolinas geradas via SRTM como decorrência de um maior refinamento das cotas altimétricas. Uma das consequências desse refinamento foi a subdivisão de depressões maiores mapeadas por IBAMA (1998), em feições menores e mais espacialmente distribuídas. Isso explica também o número maior de feições mapeadas via SRTM.

Conclui-se que o método de identificação semiautomático de dolinas via SRTM teve atuação satisfatória indicando um comportamento de sobreposição das localidades anteriormente detectadas por IBAMA (1998) com considerável área de interseção, assim como feições cársticas com alto índice de circularidade. Dessa forma, o mapa de dolinas gerado via SRTM será aplicado no item 6.1.2 (Feições Superficiais – *sf*) como base de dados na classificação de áreas mais vulneráveis.

### 5.3. Identificação de Áreas com Vegetação Representativa

O tipo de cobertura vegetal implica em distintos comportamentos nos atributos do solo e da água. A vegetação intercepta a chuva, evita a ação desestruturadora das gotas no solo, propicia condições ótimas de infiltração, contribuindo para o reabastecimento dos lençóis freáticos (McKergow *et al.* 2003), reduz o escoamento superficial evitando o fenômeno da erosão (Rizzi, 1981), além de evitar inundações.

A vegetação comporta-se como obstáculo físico aos agentes poluidores, além de atuar na proteção dos aquíferos por meio da absorção, filtragem e retenção de sedimentos, nutrientes, pesticidas e outros produtos químicos. A qualidade da água é alterada substancialmente pela remoção da vegetação, especialmente a vegetação ripária (Tundisi *et al.* 2010).

Para discriminar as diferentes fitofisionomias encontradas na área foram utilizadas as bandas espectrais 4 (Vermelho) e 5 (Infravermelho próximo) da imagem LANDSAT 8 (Item 3.3.2 – Landsat 8) aplicando-se o método *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI. Inicialmente utilizado por Rouse *et al.* (1973), o NDVI é um método de processamento de imagens que se utiliza das bandas espectrais vermelho e infravermelho nos comprimentos de onda 640-690 nm (Banda 4 Vermelho), 850-880 nm (Banda 5 Infravermelho próximo), para se quantificar o nível de reflexão da clorofila. A vegetação saudável irá absorver a luz visível (Banda 4 Vermelho) e refletir uma grande porção da luz infravermelho próximo, a vegetação muito esparsa ou pouco saudável reflete mais a luz visível e menos a infravermelho, assim como solos expostos.

Este método possui grande aplicação em estudos de vegetação como estimativas de plantações, formação de pastagens, avaliação de níveis de desmatamento, dentre muitos outros, em especial para diferenças entre período chuvoso e seco.

Para o cálculo do NDVI, é utilizada a seguinte fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Onde, NIR = Infravermelho Próximo (*Near Infrared*);

RED = Vermelho (*Red*).

Os valores do NDVI estão represados em um limite entre -1 e +1, valores negativos representam água, valores próximos de zero solo exposto e números positivos vegetação de algum tipo, seja rala ou densa.

A aplicação dessa metodologia na área apontou em uma primeira aproximação índices NDVI médios de 0,176, o que representa uma vegetação um pouco mais rala e esparsa, com mínimo de -0,045 e máximo de 0,458, o que potencialmente representam áreas antropizadas ou água, e, focos de matas mais densas, respectivamente (Tabela 20).

Tabela 20: Índices NDVI dentro dos limites da área de estudo

<b>Índice NDVI</b>	
Mínimo	-0,045
Máximo	0,458
Média	0,176
Desvio Padrão	0,053

É importante ressaltar que a imagem utilizada para essa avaliação (Landsat 8) teve passagem em época seca do ano hidrológico (28 de agosto de 2014), o que resultou em uma maior reflexão de luz visível por plantas menos saudáveis (ou mais secas), gerando, propositalmente, uma margem de segurança no desenvolvimento do método de vulnerabilidade aplicado.

Os intervalos NDVI iniciais propostos para o mapeamento da vegetação foram examinados a partir de trabalhos de Bitencourt *et al.* (1997), e Lopes *et al.* (2009), que indicam índices teóricos de tipologias vegetacionais do Cerrado (Tabela 21), as quais se aproximam das fitofisionomias encontrados na área de estudo.

Tabela 21: Comparação entre faixas NDVI propostas Bitencourt *et al.* (1997) e Lopes *et al.* (2009).

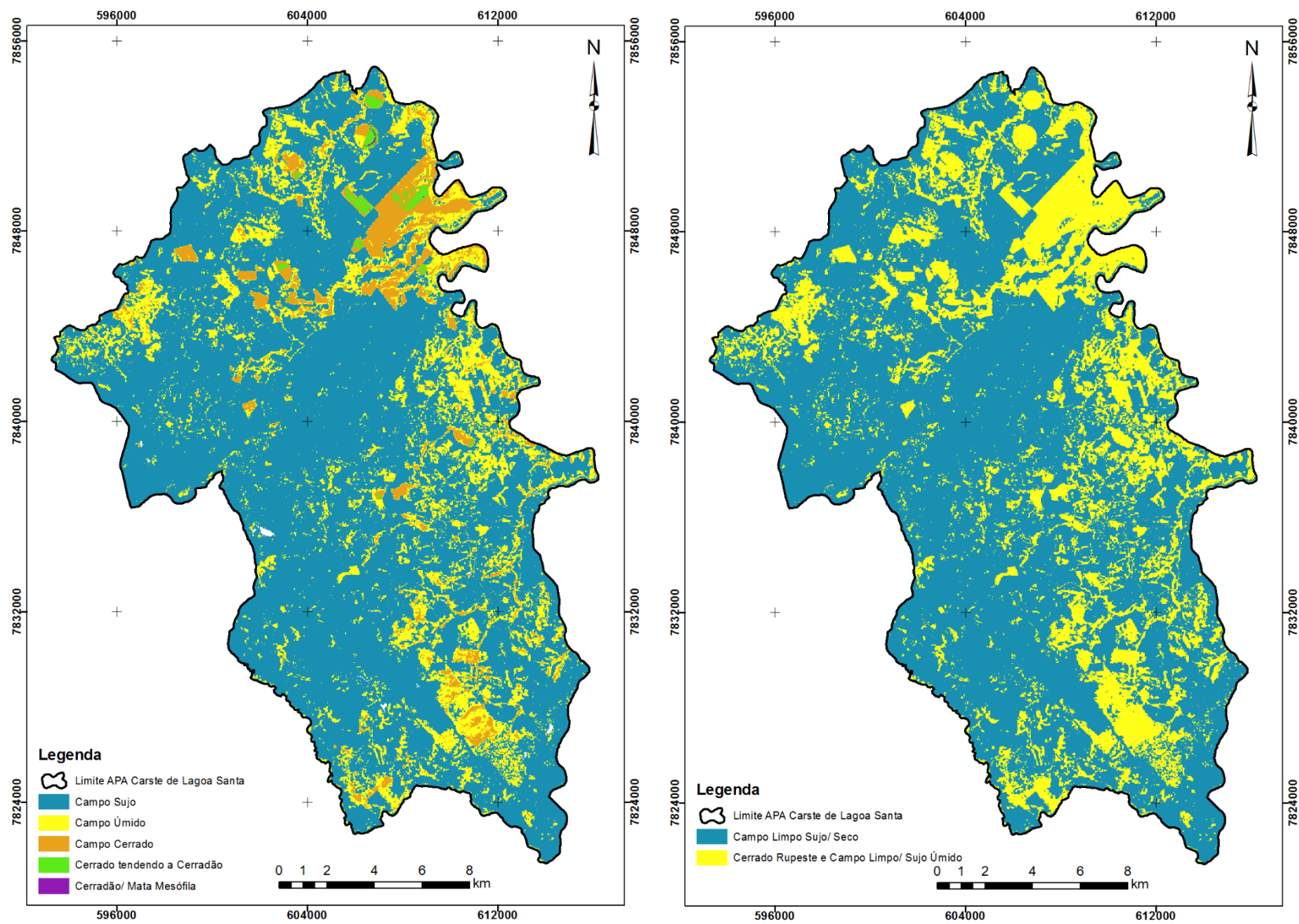
<b>Bitencourt, 1997</b>	<b>Intervalos do NDVI</b>	<b>Lopes, 2009</b>	<b>Intervalos do NDVI</b>
-	-	Áreas Antropizadas	-1 a -0,25
Campo Sujo	0,0261 a 0,2036	Campo Limpo Seco	-0,1 a 1
Campo Úmido	0,0261 a 0,2036	Campo Sujo Seco	0 a 0,2
Campo Cerrado	0,2037 a 0,2629	Cerrado Ralo	0,1 a 0,4
Cerrado sensu stricto	0,2630 a 0,3813	Cerrado Rupestre	0,1 a 0,4
Cerrado sensu stricto tendendo a cerradão	0,3814 a 0,4405	Campo Limpo Úmido	0,2 a 0,5
Cerradão	0,4406 a 0,5589	Campo Sujo Úmido	0,3 a 0,6
Mata Mesófila	0,4406 a 0,5589	Cerrado Típico	0,4 a 0,7
-	-	Mata de Galeria	0,7 a 1

Fonte: Bitencourt *et al.* (1997) e Lopes *et al.* (2009).

O Raster NDVI original foi reclassificado segundo as faixas propostas tanto por Bitencourt *et al.* (1997) como por Lopes *et al.* (2009), resultando nos mapas de vegetação da área de estudo expostos na Figura 24. Os mapas reconheceram as mesmas áreas de vegetação porém os valores sugeridos por Bitencourt *et al.* (1997) mostraram uma maior diferenciação de classes.

Os resultados dos limites utilizados segundo a bibliografia não foram representativos numa análise de consistência; logo, foram modificados para a adequação à realidade da área de estudo. Esse ajuste dos limites NDVI foi realizado pelo cruzamento das zonas vegetadas identificadas pelos dois intervalos propostos aliados, desta vez, com imagens *Google Earth Pro*, e checagem de campo. As faixas vegetacionais mais representativas para aplicação no método de vulnerabilidade considerado estão categorizadas e exemplificadas no Item 6.1.3 (Declividade e Vegetação – sv).

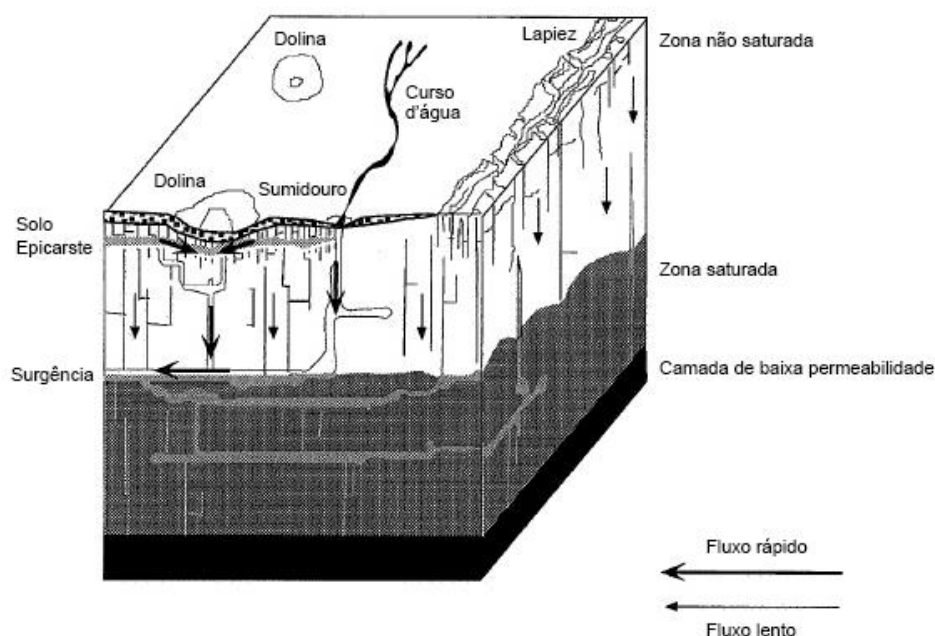
Figura 24: Faixas NDVI sugeridas por Bitencourt *et al.* (1997) (Esq.) e Lopes *et al.* (2009) (Dir.), aplicadas a área de estudo.



#### 5.4. Modelagem da Superfície Freática

A zona vadosa ou não saturada corresponde à porção superficial do material geológico, situada entre a superfície do terreno e o topo do aquífero. Caracteriza-se por ser um meio cujos poros estão ocupados pela água nas fases líquida e gasosa (Paixão, 2005). Essa zona é especialmente importante para estudos de vulnerabilidade já que está diretamente relacionada com o nível de proteção oferecido às águas subterrâneas. Sotoposta a esta, encontra-se a zona saturada, local onde as rochas e/ou solos estão com seus poros totalmente preenchidos por água subterrânea. Conseqüentemente, a água em subsuperfície se distribui e transita nos vazios dessas duas zonas principais. O limiar entre estas duas zonas é denominado superfície freática ou nível da água subterrânea (NA) (Figura 25).

Figura 25: Modelo esquemático das zonas de um aquífero cárstico e o comportamento dos fluxos da água subterrânea.



Fonte: Doerfliger *et al.* (1998).

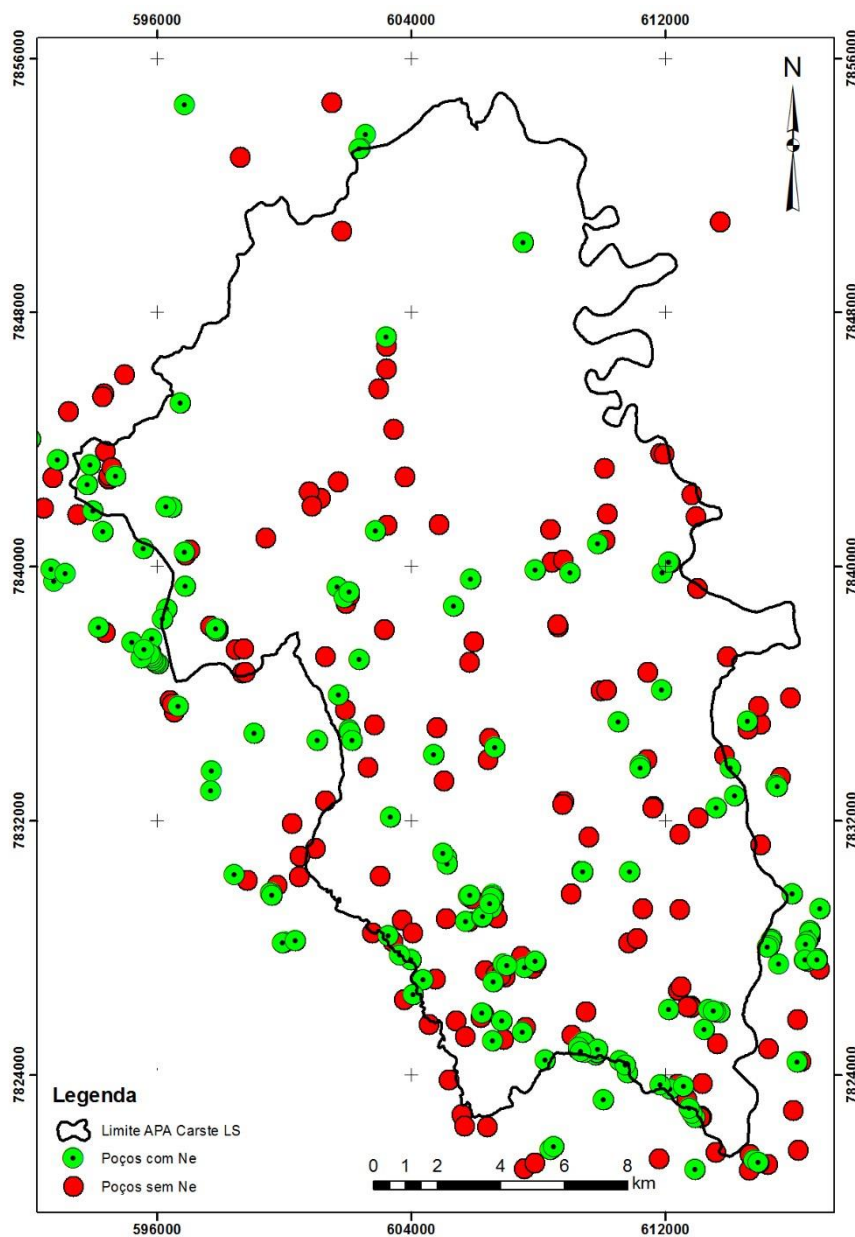
Quanto menor a distância entre a água subterrânea e a superfície do terreno, menor a espessura de material sobrejacente a zona saturada, causando a diminuição da ação natural de filtragem de contaminantes. A profundidade da água subterrânea também afeta o tempo de trânsito disponível para que ocorram vários processos bióticos e abióticos na degradação de elementos poluentes (NRC, 1993).

Devido à grande importância da zona não saturada uma superfície interpolada foi estimada nesse trabalho para definir a profundidade do lençol freático abaixo da superfície do solo, considerando o aquífero como poroso equivalente (abordagem consiste em tratar o sistema de rochas fraturadas/cársticas como se fosse um meio poroso), utilizando as elevações reais dos níveis estáticos

dos poços obtidos em campo e no banco de dados do SIAGAS (CPRM). Assim, as camadas sobrepostas ao aquífero podem ser avaliadas segundo sua profundidade e composição litológica na quantificação da proteção proporcionada por elas.

Para tal, foram considerados os níveis estáticos dos poços em situação livre dentro dos limites da área, assim como um *buffer* para os poços válidos de até 2 quilômetros do limite da área, totalizando em 170 poços com informações dessa natureza (Figura 26 e Tabela 22). Entretanto, devido às inúmeras dificuldades encontradas em relação à checagem individual dos poços em campo, foram considerados os registros dos níveis estáticos medidos na época da perfuração e tratados como uma média temporal do nível do freático.

Figura 26: Poços tubulares e cisternas com, e sem, informações de Nível Estático (ne).



Fonte: IBAMA (1998) e Autor.

Tabela 22: Distribuição de poços e informação de nível estático por município dentro dos limites da área.

<b>Município</b>	<b>Número de Poços e Cisternas</b>	<b>Número de poços com dados de Nível Estático</b>
Lagoa Santa	84	41
Funilândia	4	4
Prudente de Moraes	11	2
Pedro Leopoldo	63	31
Confins	65	37
Matozinhos	81	40
Jaboticatubas	1	0
São José da Lapa	10	3
Vespasiano	21	10
Capim Branco	3	3
<b>TOTAL</b>	<b>343</b>	<b>170</b>

Fonte: CPRM (2014) e Autor.

Para a criação da superfície freática os valores dos níveis estáticos foram interpolados por krigagem ordinária, considerando a anisotropia amostral, com dados de todos os poços válidos levantados. A partir desse procedimento foram obtidas profundidades mínimas cotadas em 640 m de altitude e com máximo em 840 m, sendo que as cotas topográficas (SRTM) variam entre 623 e 910 m de altitude.

Devido à baixa densidade amostral de alguns locais, nestes foram observados uma menor robustez geoestatística da interpolação, sendo, porventura, locais indicados para a perfuração de novos poços de controle onde futuramente o processo de interpolação possa ser refinado.

Após a geração da superfície freática pela interpolação dos níveis estáticos dos poços, foi executada uma análise da diferença entre a superfície freática interpolada e a superfície topográfica extraída via SRTM (Figura 27 e Figura 28).

Figura 27: Mapa potenciométrico da superfície freática (esq.) e mapa de profundidade do nível d'água freático (dir).

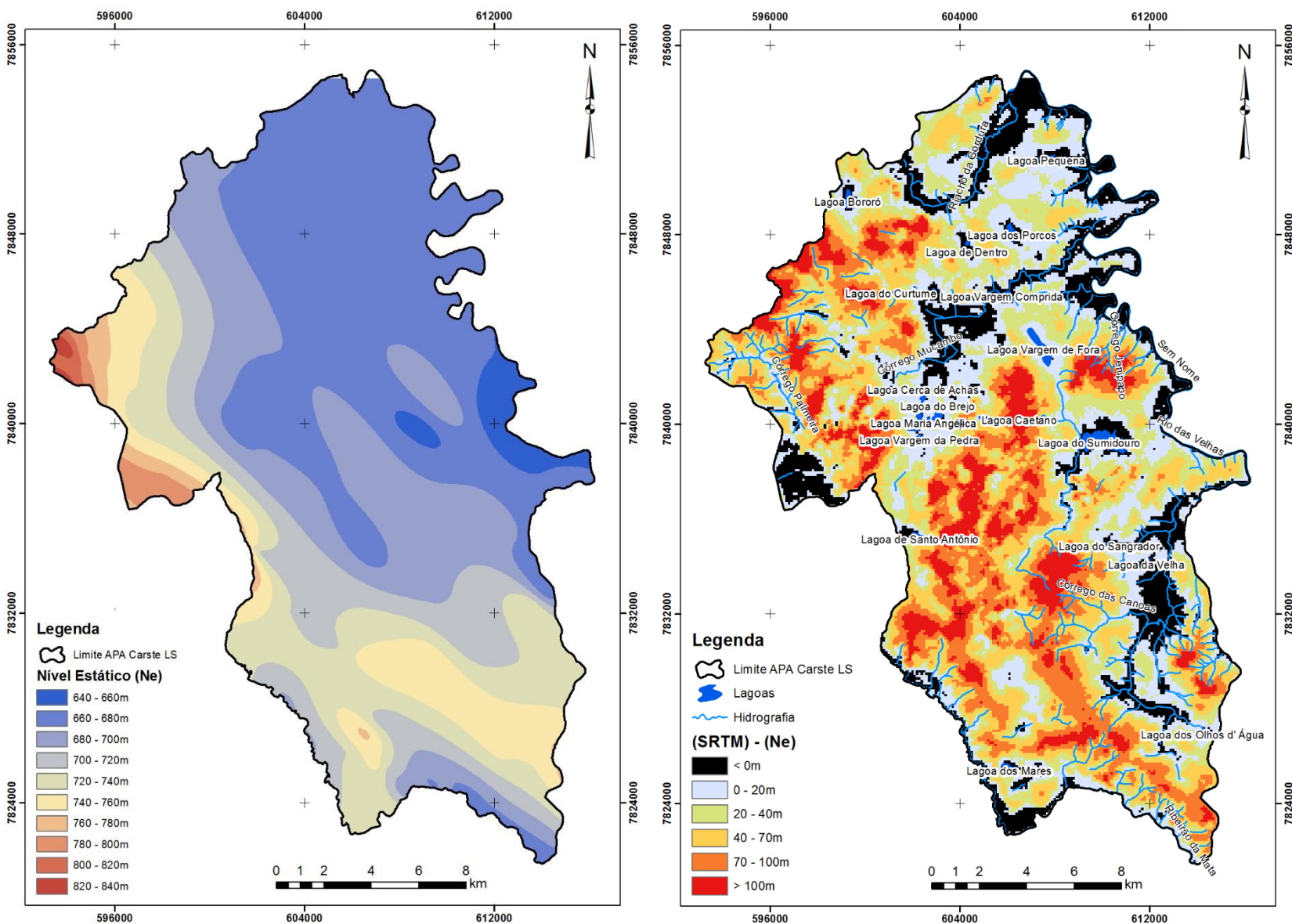
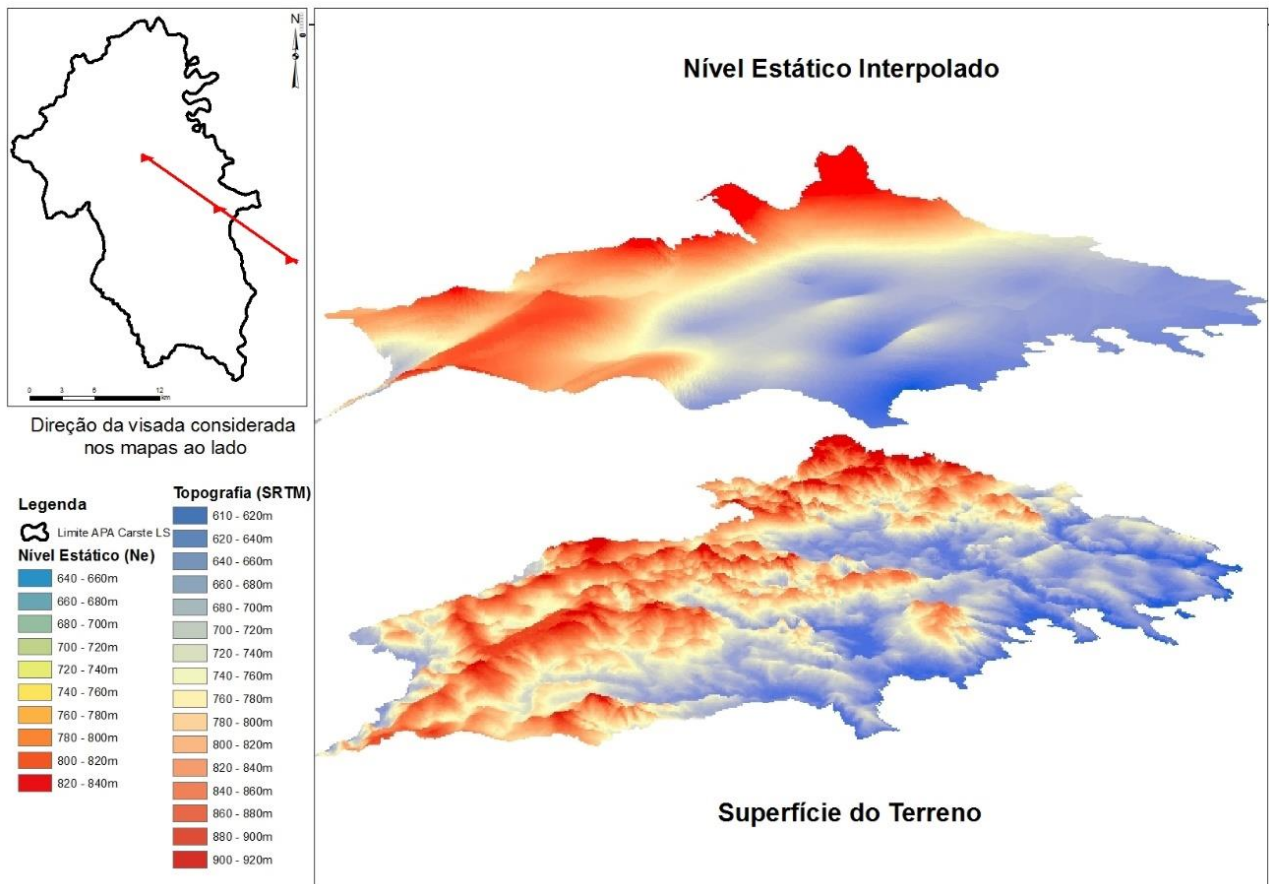




Figura 28: Visualização 3D da superfície freática em comparação com a superfície hipsométrica.

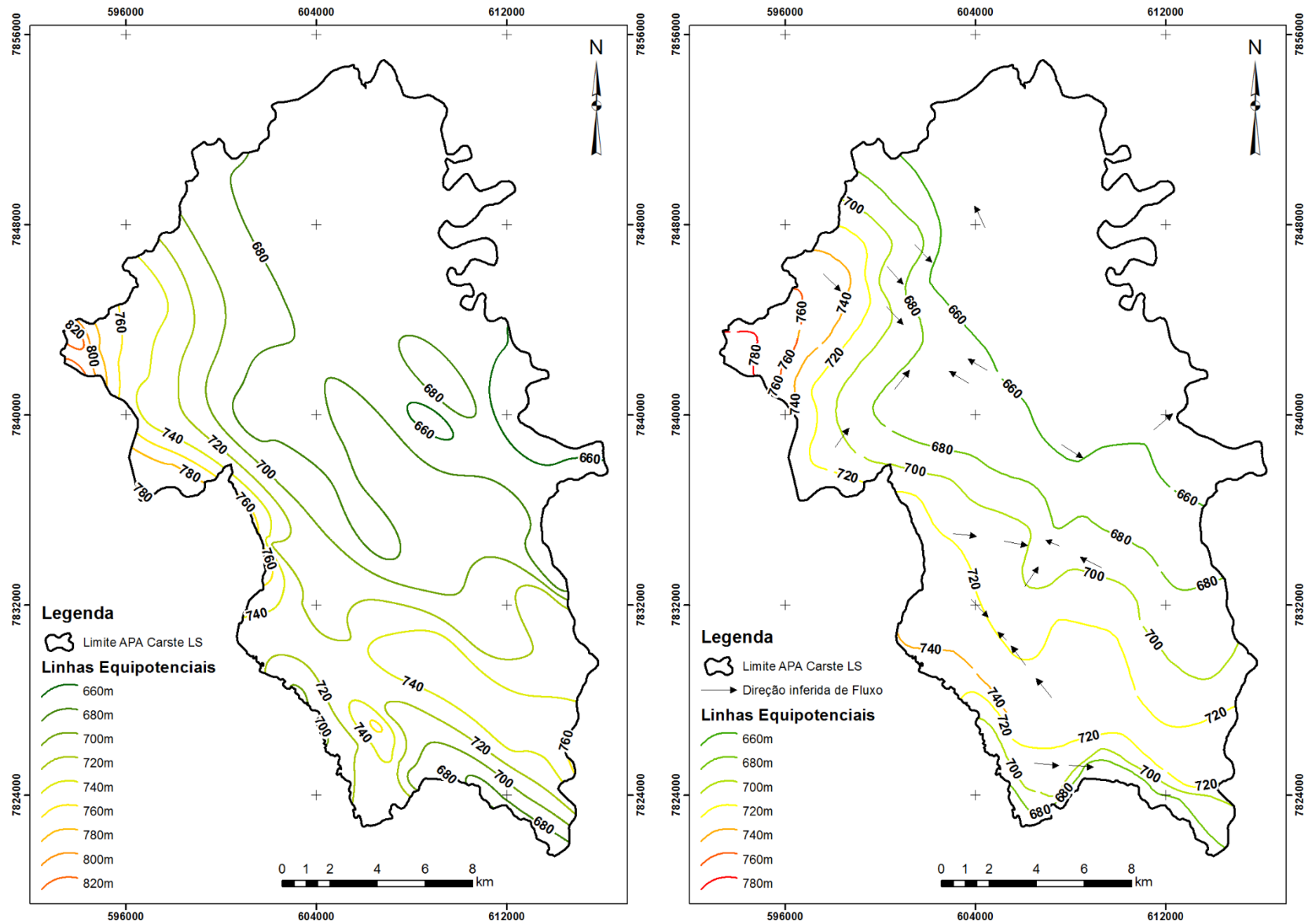


Foi observado um comportamento de descarga ou recarga do aquífero em diversas lagoas distribuídas por toda a área onde o nível freático está na ou próximo à superfície, sendo elas: Lagoa Bororó, Lagoa de dentro, Lagoa dos Porcos, Lagoa Pequena, Lagoa do Curtume, Lagoa Vargem Comprida, Lagoa Vargem de Fora, Lagoa Cerca de Achas, Lagoa do Brejo, Lagoa Maria Angélica, Lagoa Caetano, Lagoa Vargem da Pedra, Lagoa do Sumidouro, Lagoa do Sangrador, Lagoa da Velha, Lagoa de Santo Antônio, Lagoa dos Mares, Lagoa dos Olhos d'água, Lagoa Santo Antônio; e, nas imediações dos seguintes cursos d'água: Rio das velhas, Ribeirão da Mata, Córrego Mocambo, Córrego Água Doce, Córrego do Jaques, Córrego da Pindaíba e Riacho da Gordura, indicando a boa consistência da interpolação.

Finalmente, foi feita uma comparação entre as linhas equipotenciais geradas no estudo APA Carste (IBAMA, 1998) e as linhas geradas nesse estudo. O resultado mostrou uma concordância entre as direções preferenciais sudoeste-nordeste do fluxo de água para o Rio das Velhas, assim como uma considerável proximidade entre os valores das cotas mapeadas e as posições das linhas equipotenciais traçadas em cada trabalho (Figura 29).

Os dados gerados nessa seção serão aplicados no item 6.2.2 (subfator  $O_L$ ) para estimar os valores de proteção associados as profundidades dos materiais sobrepostos ao nível freático.

Figura 29: Mapa de linhas equipotenciais gerado pelo autor (esq.) e por IBAMA (1998)(dir.).



## 5.5. Modelagem Geológica

O estabelecimento do modelo geológico básico tridimensional é fundamental para se descrever apropriadamente o cenário físico do projeto, objetivando a delimitação de corpos geométricos. A modelagem envolve a estimativa das posições dos contatos geológicos em diversos pontos no espaço, nos locais onde não se possuem dados amostrais. A geoestatística é uma alternativa matemática para estimar valores em tais pontos (Souza, 2007).

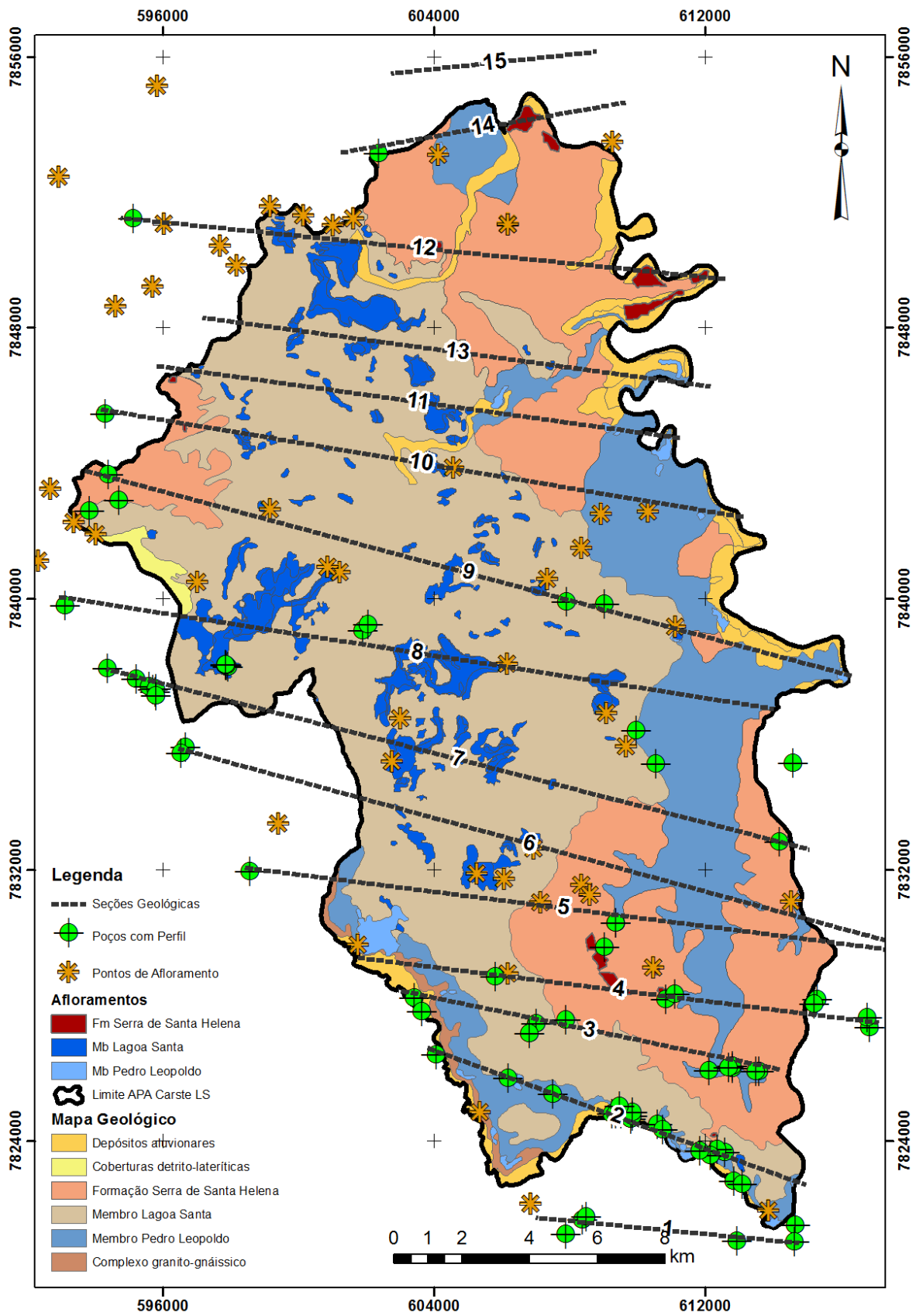
O modelo geológico permite avaliar as áreas onde a litologia fornece uma maior proteção natural ao reservatório subterrâneo, seja pela espessura da camada considerada (zona não saturada), seja por suas características intrínsecas (i.e. composição da rocha, fraturamento, desenvolvimento cárstico). Os dados de entrada para a estimação do modelo geológico foram retirados de 75 perfis construtivos de poços existentes dentro dos limites da área e em um *buffer* de 2 km, de afloramentos mapeados por IBAMA (1998) e por Vieira (2015) (Tabela 23 e Figura 30).

Tabela 23: Distribuição de poços por município dentro do *buffer* considerado e número de perfis geológico e construtivo.

Município	Número Total de Poços	Poços com Perfil
Lagoa Santa	93	23
Funilândia	2	1
Prudente de Moraes	10	2
Pedro Leopoldo	63	6
Confins	51	16
Matozinhos	80	19
Jaboticatubas	1	0
São José da Lapa	10	3
Vespasiano	19	5
<b>TOTAL</b>	<b>329</b>	<b>75</b>

Fonte: CPRM (2014) e IBAMA (1998).

Figura 30: Mapa com as variáveis de entrada para o modelo geológico básico e localização das seções verticais.



Fonte: Modificado de Vieira (2015), IBAMA (1998), e CPRM (2003).

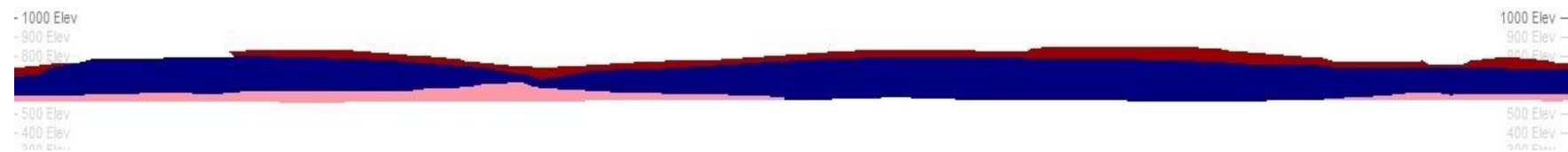
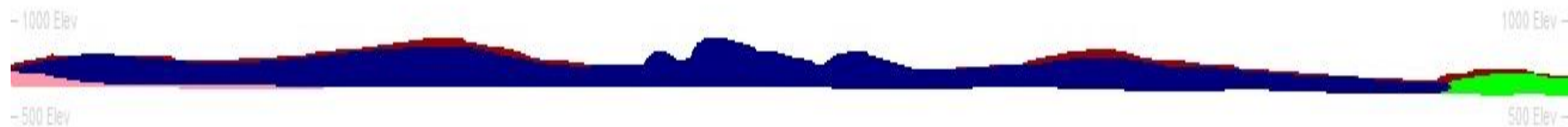
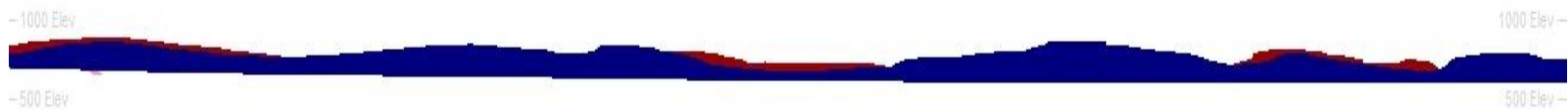
Após o estabelecimento das características regionais, os perfis descritos foram agrupados em unidades ou domínios baseados no mapeamento feito por IBAMA (1998). O tratamento dos contatos dos domínios em profundidade foi feito de forma manual através do software *Studio 3 Datamine*, onde, de posse dos perfis construtivos dos poços tubulares, topografia e das áreas de afloramento das unidades, foram geradas 15 seções verticais com direção predominantemente E-W, e espaçamento médio de 3 km, com largura total de até 1 quilômetro (Figura 30). As litologias consideradas nesse processo foram: Embasamento, Formação Sete Lagoas, Formação Serra de Santa Helena e Solos.

As seções modeladas em 2D (Figura 31) contribuíram para a compreensão e interpretação das camadas sobrejacentes à superfície freática possibilitando a avaliação dos caminhos preferenciais da água, e a proteção que cada camada pode proporcionar.

Figura 31: Seções geológicas verticais.

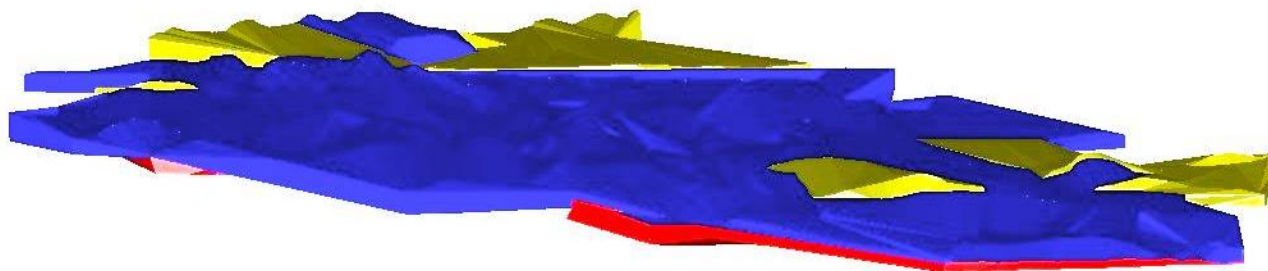
Seção 3

Legenda: ■ Solos ■ Fm Serra de Santa Helena ■ Fm Sete Lagoas ■ Embasamento

Seção 4Seção 7Seção 8

A união espacial dessas seções verticais por triangulação de pontos resultou em um modelo tridimensional do corpo geológico, utilizado como base para a estimação do modelo de blocos (Figura 32).

Figura 32: Modelo de Blocos 3d, exemplo da representação dos sólidos (embasamento, formação Serra de Santa Helena e formação Sete Lagoas).



Legenda: ■ Fm Serra de Santa Helena ■ Fm Sete Lagoas ■ Embasamento

O modelo de blocos pode armazenar qualquer característica da rocha ou da camada que possa ser medida ou definida numericamente, sendo gerado através de interpolações em 3D de superfícies verticais (seções). As informações de profundidade e litologia foram armazenadas em polígonos (blocos) individuais, com dimensões de 60 x 60m, nos eixos X e Y, e 30m no eixo Z, podendo-se acessar a profundidade das camadas em cada ponto individualmente.

É importante ressaltar que não se almejou um modelamento detalhado da geologia, tal que, na modelagem não se utilizou o mapa de fraturas nem foram indicadas zonas de possíveis falhas na área, além disso o número reduzido de dados de perfil fez com que a interpolação trabalhasse com poucas amostras refletindo assim no resultado final. Esses resultados foram julgados pelo autor como não representativos para a escala de trabalho e não foram utilizados como parâmetros de entrada para o mapeamento dos limites da zona não saturada no Item 6.2.2 (Litologia – *OI*).

## **6. APLICAÇÃO E RESULTADOS DO MÉTODO COP PARA A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA**

Como já mencionado, o método COP é baseado em três fatores: concentração de fluxo (C), camadas sobrepostas (O) e precipitação (P), em que para cada um é gerado um mapa.

A aplicação bem-sucedida do método depende da avaliação individual de todos os sete subfatores contidos nos três grandes fatores considerados em todas as suas particularidades. Para esse fim, serão utilizados os resultados dos itens 5.2 (Mapeamento semiautomático de dolinas), 5.3 (Identificação de áreas com vegetação representativa), 5.4 (Modelagem da superfície freática), e também os mapas temáticos encontrados nas bibliografias citadas no item 3.2 (Dados Secundários). Para a geração do mapa final de vulnerabilidade intrínseca foi realizado o cruzamento de todas as informações necessárias.

Os valores serão aqui aplicados de acordo com Vías *et al.* (2002) e Leyland (2008), porém algumas adaptações foram necessárias no enquadramento de algumas variáveis (i.e., solos e camadas de cobertura) de acordo com a representatividade e o funcionamento do parâmetro no contexto brasileiro, onde as condições são significativamente diferentes do local originalmente considerado pelo método.

Nesse item serão apresentados detalhadamente o desenvolvimento da aplicação do método COP na área da APA Carste de Lagoa Santa e os resultados parciais e final obtidos.

### **6.1. Fator “C” – Concentração de Fluxo**

A análise do fator concentração de fluxo se baseia fundamentalmente nas feições de potencial recarga do aquífero cárstico (dolinas, uvalas, cavernas e sumidouros), no aspecto geomorfológico relacionado à declividade e na vegetação. Esses itens foram avaliados a partir de imagens SRTM, LANDSAT 8, e do banco de dados reunido para a aplicação do método COP.

#### **6.1.1. Distância até as Feições Cársticas de Recarga (*dh* e *ds*)**

Frequentemente, na área de estudo, os sumidouros captam cursos d'água que passam a escoar subterraneamente. De acordo com o método COP, toda a rede de fluxo superficial que se torna subterrânea por feições de recarga direta, acarreta uma extrema vulnerabilidade (Ravbar, 2007).

Contaminantes provenientes de regiões distantes são mais propensos a sofrer atenuação natural antes de entrar em zonas de recarga, porém em zonas de estreita proximidade, esses elementos se tornam mais susceptíveis de serem transportados para o interior do subsolo através feições cársticas de absorção, como os sumidouros, e, conseqüentemente, para o aquífero.



Assim, os valores de proteção das variáveis  $ds$  e  $dh$  elevam-se com o aumento da distância dessas feições de infiltração direta. O subfator  $ds$  corresponde especificamente aos cursos d'água superficiais que contribuem com a recarga direta do aquífero, “desaparecendo” através de sumidouros. Os valores de proteção aqui adotados variam entre 0, 0,5 e 1, aumentando nesta ordem, conforme sugerido por Vías *et al.* (2002) (Tabela 24).

Tabela 24: Distribuição de valores da variável  $ds$

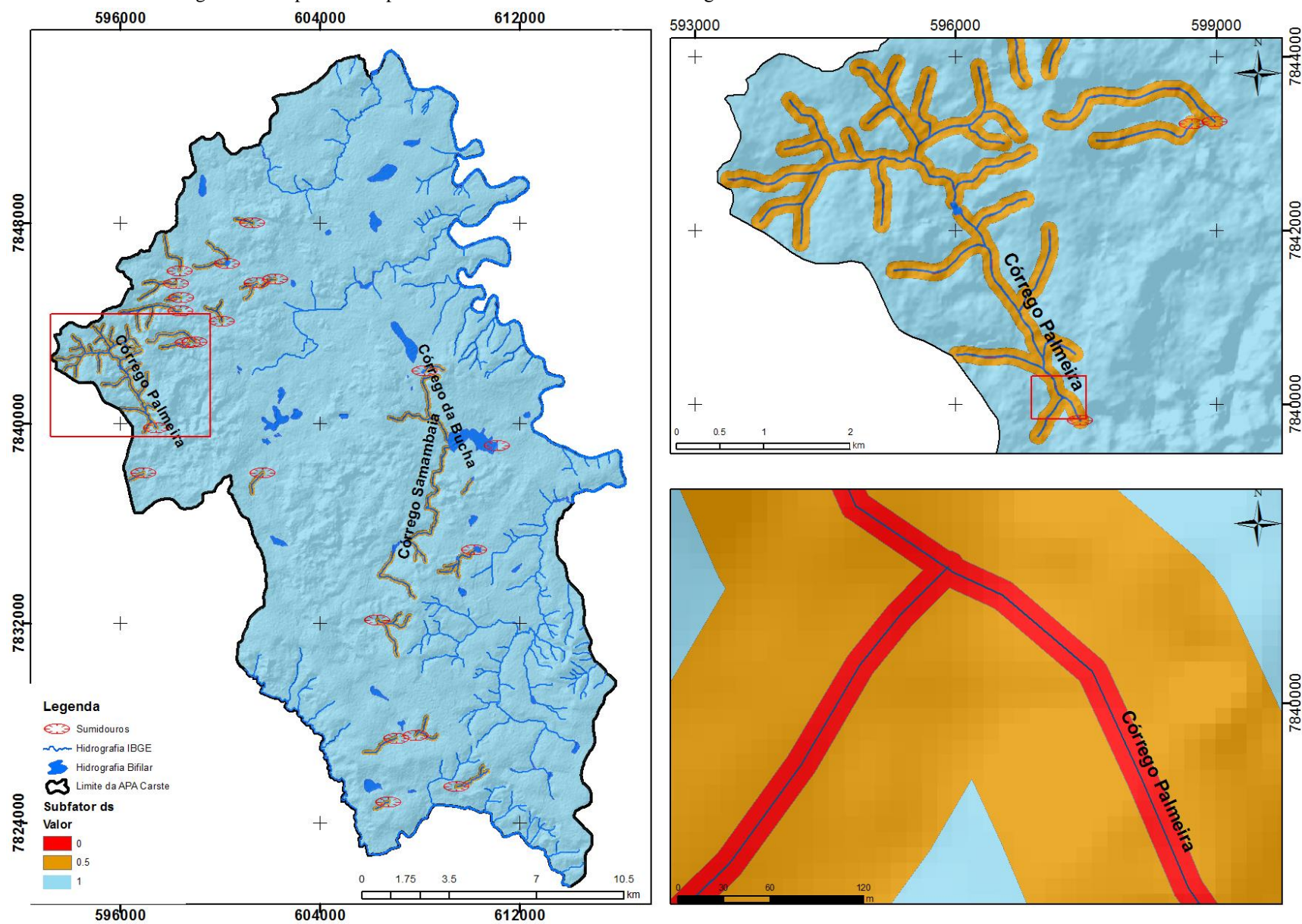
Distancia de cursos d'agua associados a sumidouros em projeção horizontal	Valor ( $ds$ )
< 10m	0
10 – 100m	0,5
> 100m	1*

\*aplica-se também para o restante da área não associada à presença de sumidouros.

Fonte: Vías *et al.* (2002).

Para a análise do fator  $ds$  foram utilizados mapeamentos da hidrografia, dos sumidouros (IBAMA, 1998) e da topografia (SRTM). Um *buffer* foi gerado ao longo dos cursos d'água que se tornam subterrâneos, e atribuídos os valores de proteção especificados na Tabela 24, para cada faixa de distância aos cursos d'água (Figura 33). Os cursos d'água mais importantes envolvidos neste tipo de recarga são: Córrego Samambaia, Córrego Palmeira e Córrego da Bucha.

Figura 33: Mapa final do parametro  $d_s$  – distância dos cursos d'água diretamente conectados com o meio subterrâneo.



A subfator *dh* relaciona-se exclusivamente às feições de absorção da recarga direta, como os sumidouros (Figura 34). Os valores considerados no aumento da proteção oferecida ao aquífero progridem aritmeticamente em função do aumento da distância radial em relação as feições (Tabela 25). O sistema de *buffering* original define um raio de até 5.000 metros como áreas de captação de sumidouros, distância representativa para os grandes platôs cársticos encontrados na Europa (Vías *et al.* 2002). Já Leyland (2008), sugere uma distância máxima de até 2.400 metros para a aplicação na África do Sul.

Tabela 25: Comparação dos valores e distâncias consideradas por Vías *et al.* (2002) e Leyland (2008).

Vías <i>et al.</i> (2003)		Leyland (2008)	
Distância (m)	Valor (dh)	Distância	Valor (dh)
≤ 500	0	≤ 50	0
(500 – 1000)	0.1	(50 – 100)	0.1
(1000 – 1500)	0.2	(100 – 200)	0.2
(1500 – 2000)	0.3	(200 – 300)	0.3
(2000 – 2500)	0.4	(300 – 450)	0.4
(2500 – 3000)	0.5	(450 – 600)	0.5
(3000 – 3500)	0.6	(600 – 900)	0.6
(3500 – 4000)	0.7	(900 – 1200)	0.7
(4000 – 4500)	0.8	(1200 – 1800)	0.8
(4500 – 5000)	0.9	(1800 – 2400)	0.9
> 5000	1.0	> 2400	1.0

Fonte: Vías *et al.* (2002) e Leyland (2008).

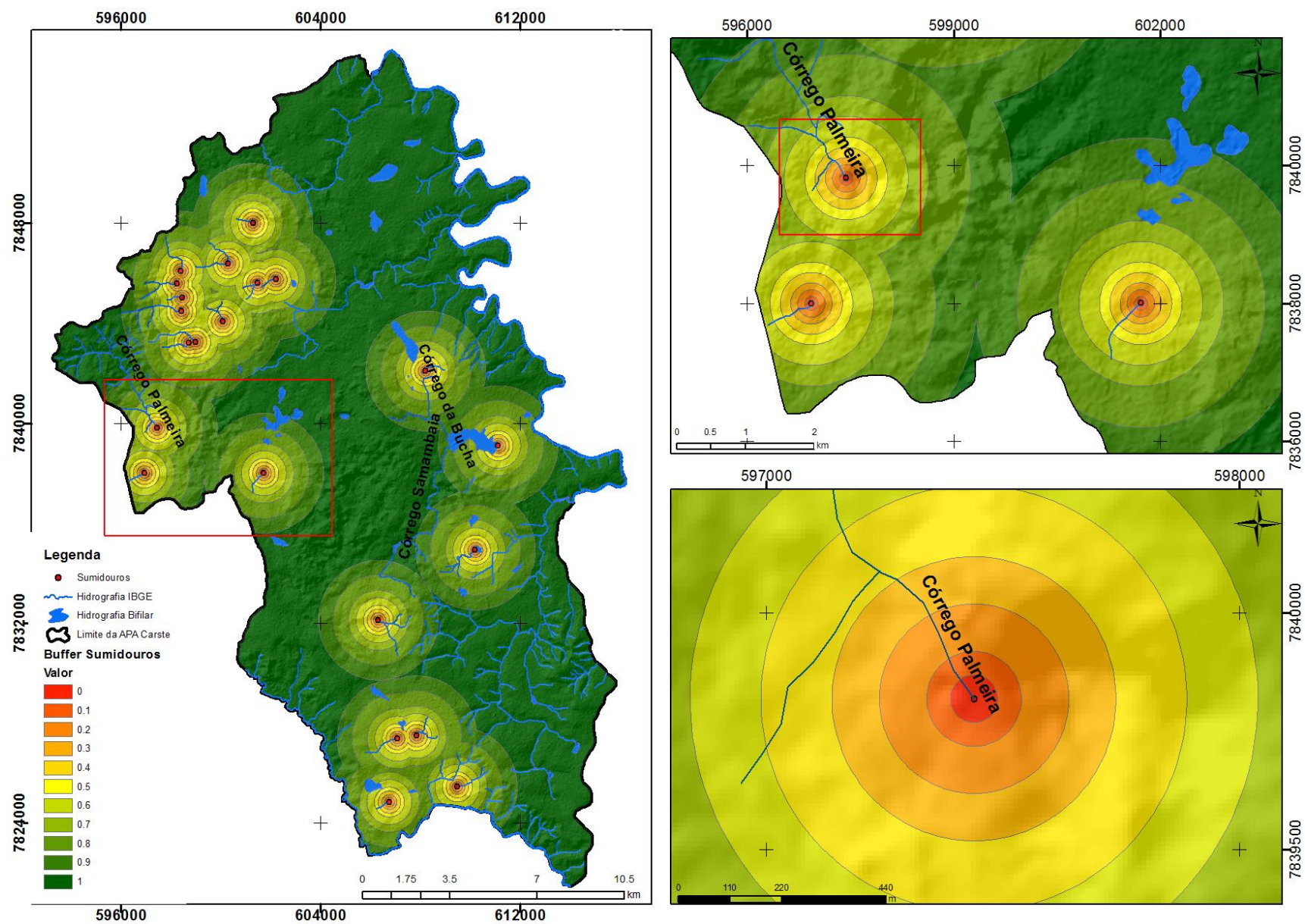
Figura 34: Exemplo de sumidouro na região do Mocambeiro.



Segundo moradores um córrego desaparece no sumidouro destacado à esquerda. As gretas de contração à direita indicam a presença dessa água. Fotografia tomada em período de estiagem histórica em 2015.

Dadas as condições encontradas na APA Carste de Lagoa Santa e considerando o raio de círculo equivalente da maior depressão fechada identificada no Item 5.2 (Mapeamento semiautomático de dolinas), correspondente à Lagoa do Sumidouro, com raio de aproximadamente 2.700 metros, decidiu-se pela utilização dos limites sugeridos por Leyland (2008). Assim, foram traçados os limites com seus respectivos valores culminando no mapa final do subfator *dh* (Figura 35).

Figura 35: Mapa final do parâmetro  $dh$  – distância até os sumidouros.



### 6.1.2. Feições Superficiais (*sf*)

O subfator feições superficiais (*sf*) descreve a situação onde o aquífero não apresenta uma recarga direta através de sumidouros. Baseia-se nas características geomorfológicas das rochas carbonáticas com a presença ou ausência de uma camada sotoposta a esses materiais, determinantes nos processos de escoamento e/ou infiltração (Zwahlen, 2003). Considera o desenvolvimento de feições cársticas e camadas de cobertura superficiais (Tabela 26).

Tabela 26: Valores e feições consideradas no subfator Feições Superficiais (*sf*).

Feições Cársticas	Camadas Superficiais		
	Ausência	Permeável	Impermeável
Carste Desenvolvido	0,25	0,50	0,75
Pouco Desenvolvido ou Feições de Dissolução	0,50	0,75	1
Carste Fissurado	0,75	0,75	1
Ausência de Feições Cársticas	1	1	1

Fonte: Vías *et al* (2002).

Em um sistema cárstico bem desenvolvido, um menor escoamento superficial e altas taxas de infiltração reduzem a proteção do aquífero. Da mesma forma, a ausência de uma camada acima das rochas cársticas promove uma infiltração rápida e, como tal, reduz a proteção aquífero (Leyland, 2008), o que explica os menores valores de proteção associados a essas situações.

A natureza e presença de camadas superficiais que cobrem rochas carbonáticas, assim como as feições cársticas, podem ser deduzidos a partir de mapas geológicos, mapas de solos, de dolinas e de uso e ocupação, utilizados na criação do mapa do fator O. As associações desses parâmetros com os valores sugeridos por Vías *et al.* (2003) são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27: Associação das situações das coberturas encontradas na área com os valores sugeridos por Vías *et al.* (2002).

Feições	Camadas Superficiais (cobertura)					
	Ausência	Valor	Permeável	Valor	Impermeável	Valor
<b>Carste desenvolvido</b>	Afloramentos do Mb Lagoa Santa/ Cavernas	0,25	Dolinas do Mb Lagoa Santa	0,50	-	0,75
<b>Pouco desenvolvido ou feições de dissolução</b>	Afloramentos do Mb Pedro Leopoldo	0,50	Demais áreas do Mb Lagoa Santa/ Dolinas do Mb Pedro Leopoldo	0,75	-	1
<b>Carste fissurado</b>	Afloramentos da Fm Serra de Santa Helena	0,75	Demais áreas do Mb Pedro Leopoldo/ Depressões na Fm Serra de Santa Helena	0,75	-	1
<b>Ausência de Feições Cársticas</b>	-	1	Aluviões e Terraços Aluvionares / Demais áreas da Fm Serra de Santa Helena	1	Embasamento	1

Para as áreas seccionadas nessa etapa foi levada em consideração a capacidade de infiltração relacionada ao desenvolvimento, ou não, de feições de superfície encontradas na área sendo elas: afloramentos rochosos, depressões fechadas, cavernas, aluviões e terraços aluvionares.

Para os afloramentos rochosos, salvo o embasamento, foram dados os menores valores relativos por se apresentarem expostos sem nenhuma cobertura representativa. A ordem crescente dos fatores de proteção varia com o nível de desenvolvimento do sistema cárstico em cada tipologia de rocha, portanto, os afloramentos do carste desenvolvido no membro Lagoa Santa receberam os menores valores de proteção (0,25), o membro Pedro Leopoldo e formação Serra de Santa Helena valores intermediários (0,5 e 0,75, respectivamente), e o embasamento, por sua característica de rocha cristalina, valor máximo (1).

As cavernas identificadas pelo CECAV (2014) foram incluídas na mesma categoria que os afloramentos da formação Lagoa Santa, já que representam zonas de intensa carstificação e, logo,

maior vulnerabilidade. Assim, se considerou um raio aleatório de influência de 35m para cada ponto das cavidades cársticas (cavernas e grutas).

As dolinas mapeadas no item 5.2 (Mapeamento semiautomático de dolinas) foram consideradas como áreas de maior vulnerabilidade, já que podem estar relacionadas a caminhos preferenciais de recarga do aquífero. Segundo IBAMA (1998), o alinhamento de dolinas verificado na área sugere um controle estrutural dessas formas, caracterizando-as como dolinas de dissolução relacionadas à absorção do escoamento superficial, de forma difusa e concentrada ao longo de fraturas e juntas. Apresentam-se com ou sem água com seus cones de absorção totalmente preenchidos por material residual ou coluvial.

Dessa forma, as dolinas associadas ao Membro Lagoa Santa receberam valores menores de proteção (0,5) enquadradas em uma situação de feições típicas de um carste desenvolvido preenchidas com materiais de cobertura permeáveis, consequência do maior potencial dissolutivo das rochas dessa litologia (calcarenitos) e, logo, maior probabilidade de recarga por águas provenientes da superfície. O restante da área, sem a presença de dolinas, foi considerada como uma zona de feições cársticas menos desenvolvidas, mas ainda com feições de dissolução pronunciadas, recebendo o valor de 0,75.

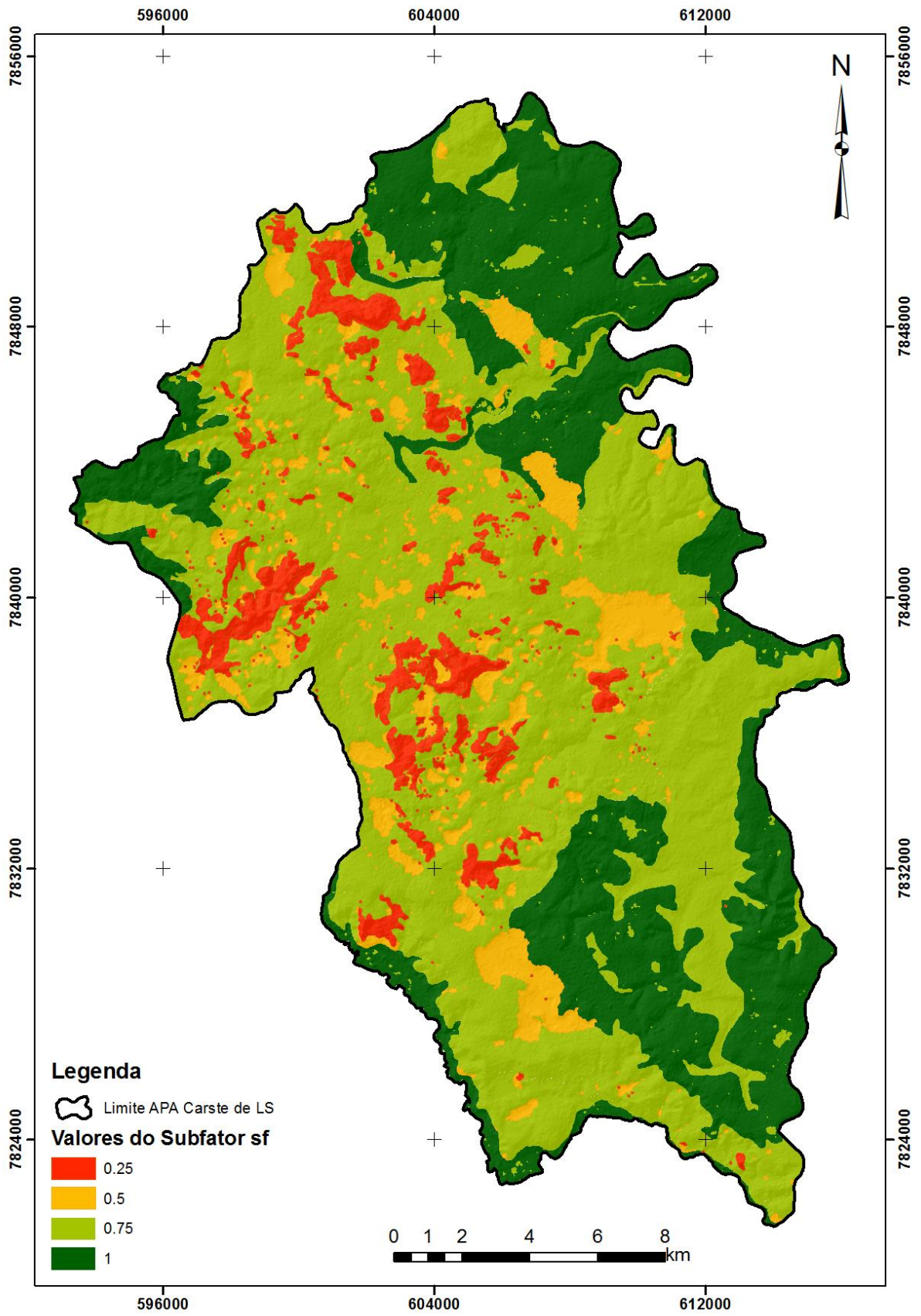
As dolinas do Membro Pedro Leopoldo receberam valores da ordem de 0,75 levando em consideração o seu comportamento diferenciado em relação a possível recarga atuando como um carste com feições de dissolução, porém menos desenvolvido. Para as demais áreas dessa litologia, e para as dolinas da Formação Serra de Santa Helena, foram conferidos valores referentes a um carste fissurado, ambos da ordem de 0,75. Já para as demais áreas da Formação Serra de Santa Helena os valores foram relacionados a áreas com ausência de feições cársticas.

Os aluviões e terraços aluvionares, assim como as demais áreas da Formação Santa Helena, receberam valor igual a 1, referente a áreas com ausência de feições cársticas.

É importante salientar que não foi possível se precisar a conexão entre dolinas e cavernas e o aquífero, por isso essas variáveis foram aplicadas no presente item. Caso fosse comprovada essa conexão, tais feições teriam sido consideradas no item 6.1.1 (Distância até as feições cársticas de recarga) como feições de recarga concentrada.

O cruzamento dessas variáveis levou ao mapa final do subfator *sf* “feições superficiais” (Figura 36).

Figura 36: Mapa final do subfator sf (feições superficiais).





### 6.1.3. Declividade e Vegetação (*sv*)

As zonas de recarga dos aquíferos cársticos são condicionadas, principalmente, por feições de absorção direta como dolinas e sumidouros, estes podendo estar associados à evolução das próprias dolinas, geralmente em regiões com declividades relativamente planas a onduladas. A declividade do terreno é um dos fatores responsáveis pelo gradiente hidráulico no escoamento superficial. Assim, quanto maior for a declividade, maior o escoamento superficial e menor a chance da recarga difusa do aquífero, e vice-versa. O aumento do escoamento superficial é um complicador especial em ambientes cársticos, visto o rápido processo de recarga através dos sumidouros. Logo, um maior escoamento superficial acarreta em uma recarga direta mais rápida, resultando em um aumento da vulnerabilidade em áreas com essas características, ao passo que em áreas de recarga difusa o aumento do escoamento superficial acarreta em uma diminuição da vulnerabilidade.

A vegetação por sua vez influencia diretamente no escoamento superficial se comportando de maneira inversa à declividade em relação à recarga nos dois cenários considerados. No cenário de áreas de recarga direta a proteção fornecida pela densidade vegetacional diminui à medida que a declividade aumenta e que a vegetação se torna mais rala, e no cenário de recarga difusa a proteção aumenta com a diminuição do adensamento da vegetação e com o aumento da declividade.

A análise dos valores atribuídos ao subfator *sv* se baseia em um cruzamento entre a densidade vegetacional e a declividade, variáveis que influem diretamente na modificação do regime do escoamento superficial. A declividade é positivamente correlacionada com a geração de escoamento superficial, enquanto densidade de vegetação está negativamente correlacionada com esse escoamento (Leyland, 2008). O efeito da densidade de vegetação na geração de escoamento superficial é considerado negligenciável em áreas onde a inclinação seja igual ou inferior a 8% ou maior que 76%. Assim, os valores de proteção atribuídos na combinação da vegetação com a declividade se comportam de forma inversa na avaliação de cada um dos dois cenários considerados (Tabela 28 e Tabela 29), quais sejam: i) a recarga por sumidouros (recarga direta) e ii) ausência de recarga em sumidouros (recarga difusa). No primeiro cenário (recarga por sumidouros) os valores de proteção diminuem com o aumento da declividade e diminuição da densidade vegetacional dentro de cada classe de declividade, que resulta em um maior escoamento superficial, e, logo, a redução do tempo de transporte até o interior dos sumidouros. Entretanto, no segundo cenário onde as áreas não sofrem recarga em sumidouros, quanto maior a declividade e menor a densidade vegetacional dentro de cada classe de declividade, os valores de proteção aumentam, consequência de um menor potencial de infiltração difusa em razão do aumento do escoamento superficial.

Em relação à caracterização da variável “densidade de vegetação”, Vías *et al.* (2002) sugerem uma divisão em duas classes: presença e ausência de vegetação. Porém as áreas vegetadas foram categorizadas nessa seção de acordo com Leyland (2008), que adiciona mais uma classe (esparsa) a essa diferenciação. Os valores são basicamente os mesmos, sendo que Leyland (2008) propõe uma classe a mais com um valor intermediário. Todas as classes estão relacionadas aos mesmos intervalos de declividade nos dois trabalhos e são associadas a cenários de potencial de recarga direta do aquífero em sumidouros, ou a recarga difusa em demais áreas do aquífero.

É importante ressaltar que ambas as classificações são vagas em relação aos parâmetros de enquadramento das classes vegetacionais, ficando a cargo do pesquisador a correta interpretação do quão protetivo cada faixa pode ser para o sistema hidrogeológico local.

Tabela 28: Comparação entre os valores atribuídos aos parâmetros declividade e vegetação por Vías *et al.* (2002) e Leyland (2008) no cenário 1 - Áreas de recarga direta do aquífero sob influência de sumidouros.

Vías <i>et al.</i> (2002)			Leyland (2008)		
Declividade (%)	Vegetação	Valor de Proteção	Declividade (%)	Vegetação	Valor de Proteção
≤ 8	Indiferente	1	≤ 8	Indiferente	1
(8 – 31)	Sim	0,95	(8 – 31)	Alta	0,950
	Não	0,90		Esparça	0,925
(31-76)	Sim	0,85		Alta	0,850
	Não	0,80	Esparça	0,825	
>76	Indiferente	0,75	>76	Indiferente	0,750

Fonte: Vías *et al.* (2002) e Leyland (2008).

Tabela 29: Comparação entre os valores atribuídos aos parâmetros declividade e vegetação por Vías *et al.* (2002) e Leyland (2008) no cenário 2 – Recarga difusa e demais áreas do aquífero.

Vías <i>et al.</i> (2002)			Leyland (2008)		
Declividade	Vegetação	Valor de Proteção	Declividade	Vegetação	Valor de Proteção
≤ 8%	Indiferente	0,75	≤ 8%	Indiferente	0,750
(8 – 31)	Sim	0,80	(8 – 31)	Alta	0,800
	Não	0,85		Esparsa	0,825
(31-76)	Sim	0,90	(31-76)	Baixa	0,850
	Não	0,95		Alta	0,900
>76%	Sim	0,90	>76%	Esparsa	0,925
	Não	0,95		Baixa	0,950
>76%	Indiferente	1	>76%	Indiferente	1

Fonte: Vías *et al.* (2002) e Leyland (2008).

A partir das fitofisionomias identificadas pelo método NDVI (Item 5.3 – Identificação de áreas com vegetação representativa), das descrições feitas por IBAMA (1998), dos limites de densidade considerados por Leyland (2008), e da interpretação das imagens *Google Earth Pro*, a densidade de vegetação da área desse estudo foram reagrupados em três faixas NDVI (Tabela 30).

Tabela 30: Agrupamento das fitofisionomias por densidades de vegetação segundo método COP modificado e os limites máximo e mínimo das faixas NDVI.

Fitofisionomias da área (IBAMA, 1998)	Densidade de Vegetação (Leyland, 2008)	Faixas NDVI	% de representatividade
Campo Pasto Pasto Sujo Área não vegetada Áreas Antropizadas Campo Cerrado	Baixa	-0,0449 até 0,1501	31,51
Cerrado	Esparsa	0,1501 até 0,1660	17,52
Área Cultivada Zona de Transição Mata/ Cerrado Mata seca Mata Ripária Mata Pluvial	Alta	0,1660 até 0,4577	50,97

Ressalta-se que foram visitados pontos de controle com aferição de campo na área estudada (Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40), visando a confirmação das faixas de densidade vegetacionais e refino dos limites traçados, resultando no mapa final de vegetação (Figura 41).

Figura 37: Vista geral das densidades vegetacionais consideradas no subfator sv.

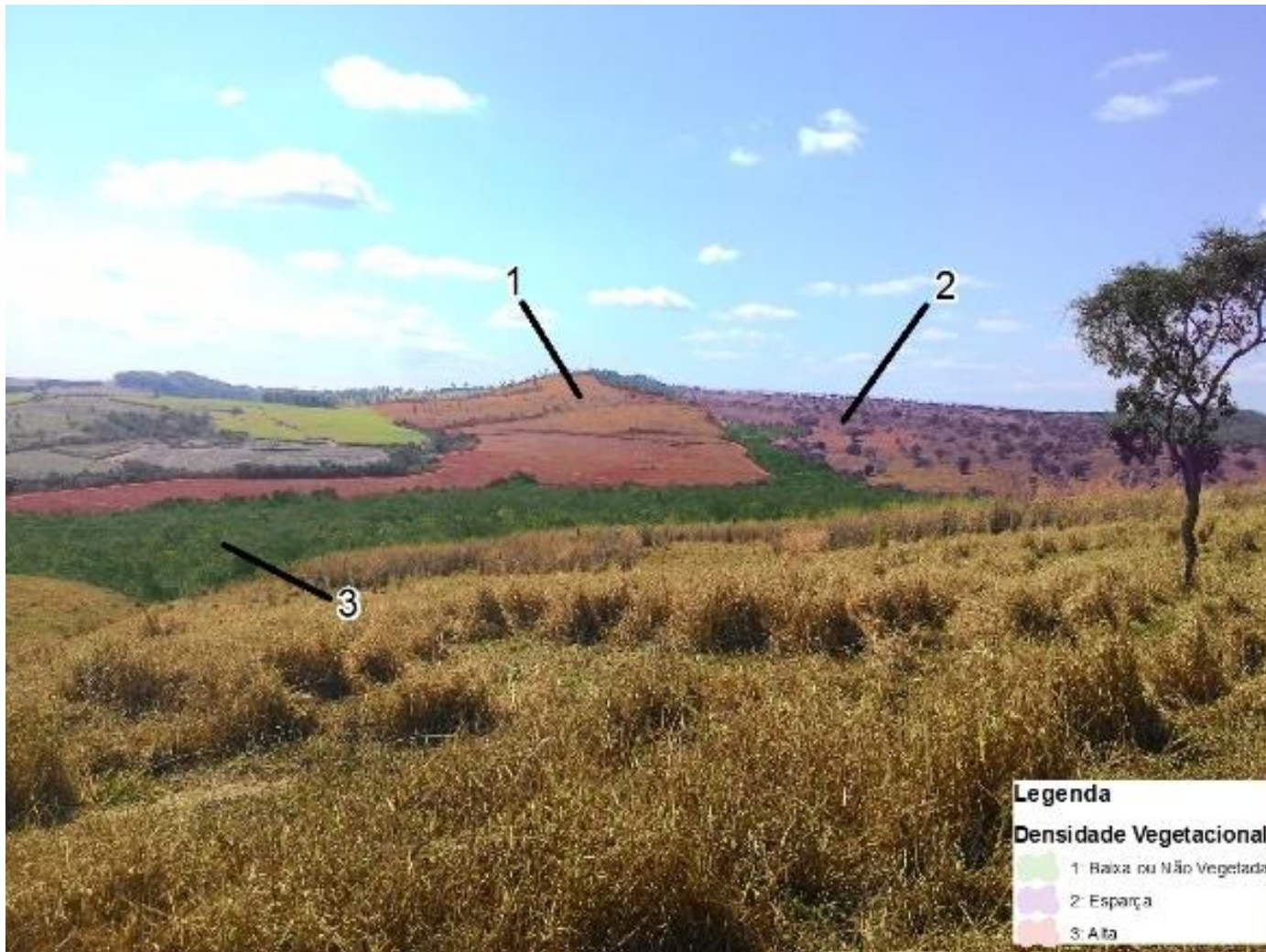


Figura 38: Baixa Densidade Vegetacional (1)

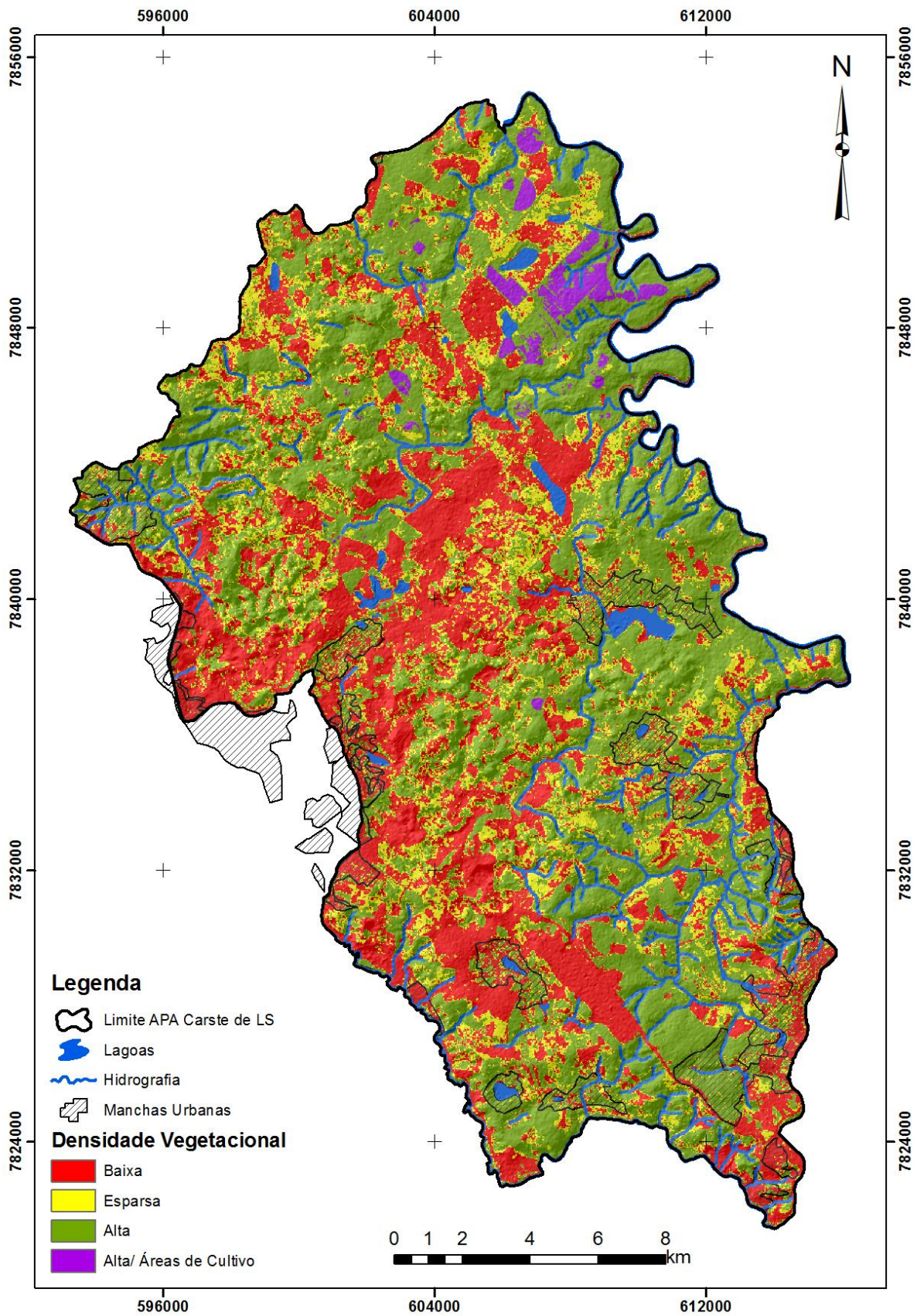


Figura 40: Vegetação Esparsa (2)



Figura 39: Alta Densidade Vegetacional (3)

Figura 41: Mapa final da densidade vegetação considerando as faixas propostas por Leyland (2008), gerado via NDVI.



A declividade da área foi calculada a partir de imagem SRTM refinada (pixel 10x10 m), pela ferramenta *Slope* (ArcGIS 10).

Os limites das faixas de declividade foram estabelecidos conforme as indicações contidas no método COP (Vías, et al., 2002). A Tabela 31 indica que a área não apresenta altas declividades e sua distribuição se concentra entre 8 e 31% com média geral de 13,6% e desvio padrão de 9,9%. Pode-se afirmar que a maior parte da área exibe terrenos planos conforme representado no mapa de declividade (Figura 42).

Tabela 31: Faixas de declividade determinadas pelo método COP e sua representatividade na área.

Faixas de declividade	Representação na área (%)	Estatísticas gerais básicas	
		Média	Desvio Padrão
Até 8%	32,30		
8-31%	61,65	13,6%	9,9%
31-76%	6,00		
>76%	Insignificante (0,06 %)		

Os mapas da Figura 43 demonstram a diferença entre o comportamento apresentado pelo subfator *sv* em cada cenário considerado. O comportamento inverso dos valores de proteção é resultado da diferença entre o tipo de recarga, seja ela direta ou difusa, e de como as variáveis declividade e vegetação a influenciam.

Figura 42: Mapa de declividade da área

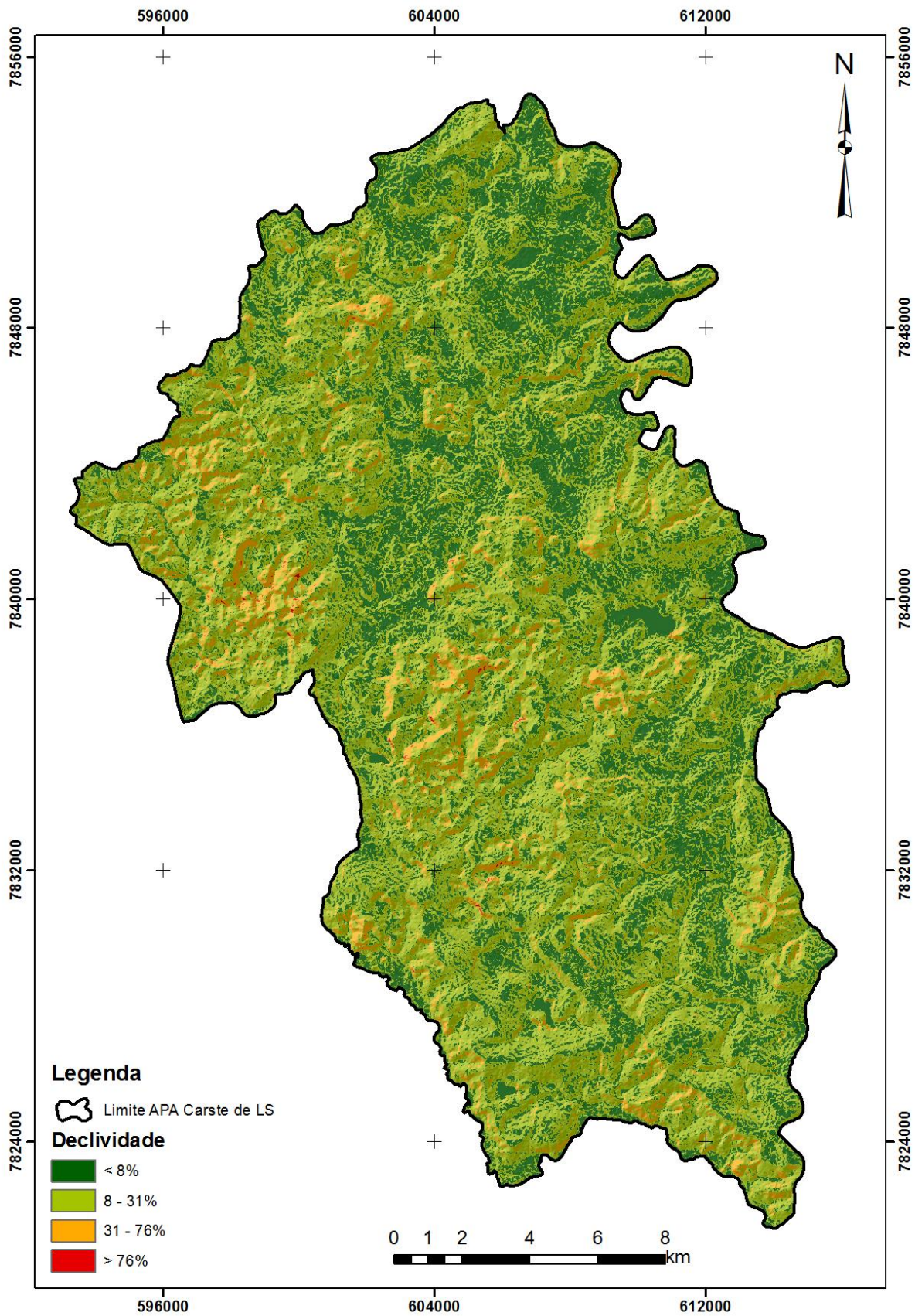
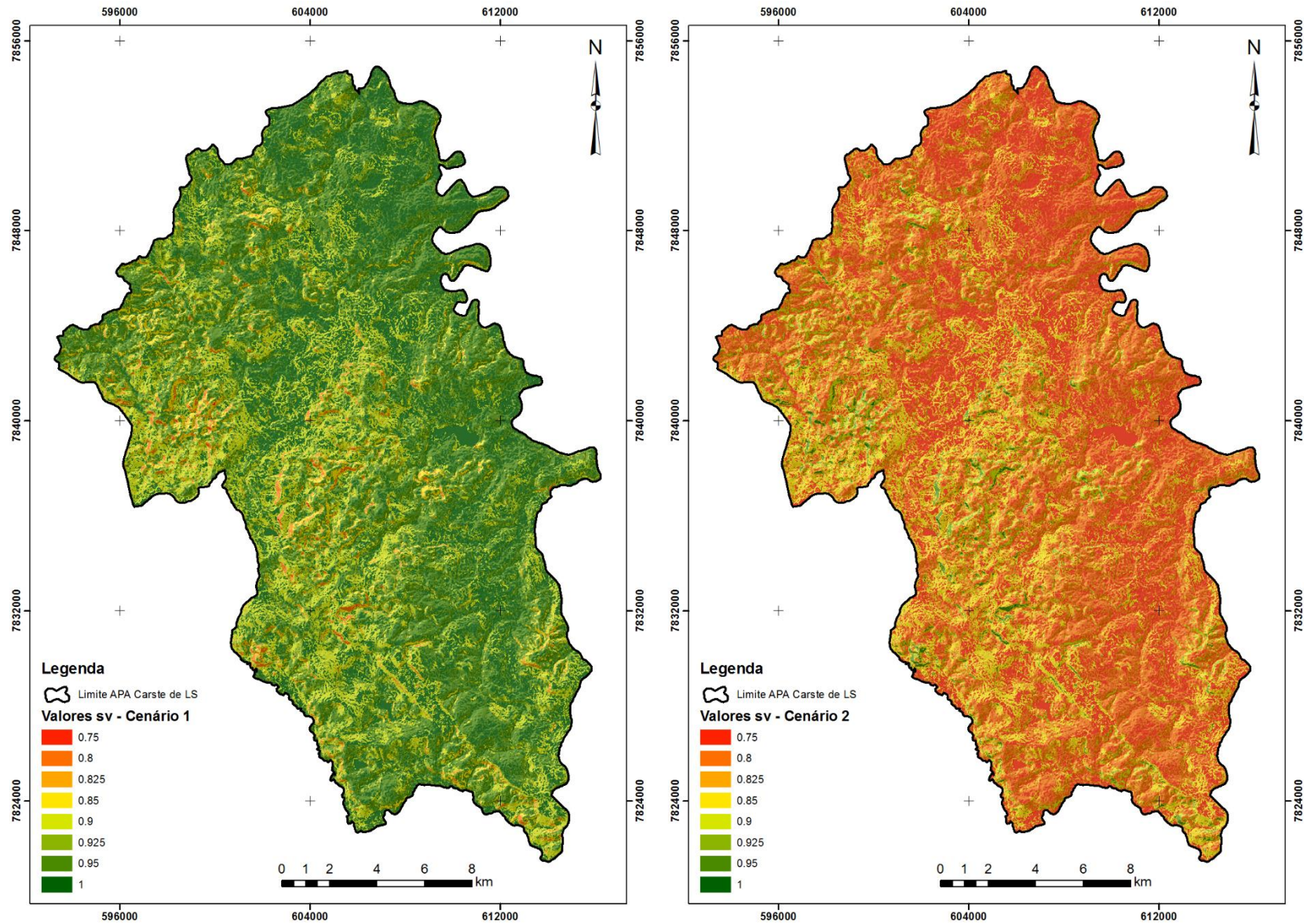


Figura 43: Mapas do subfator  $sv$  representados em cada um dos cenários.



Os resultados obtidos nessa seção serão utilizados no Item 6.1.4.3 (Mapa final do Fator C) associados aos subfatores  $sv$  (6.1.4.1) e  $sf$  (6.1.4.2) para o cálculo do fator “C” – concentração de fluxo.

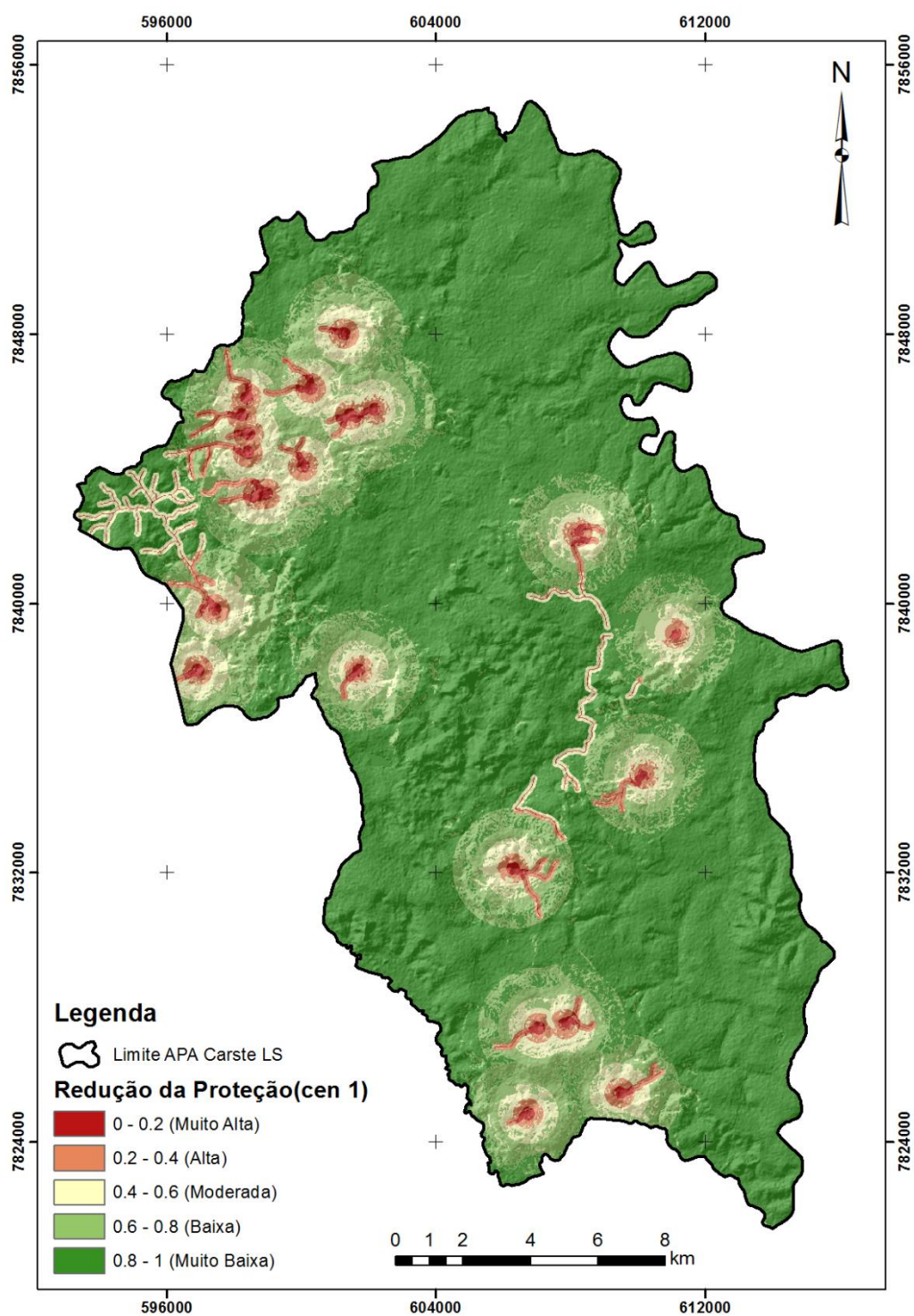
#### **6.1.4. Cálculo do Fator “C”**

O cálculo do Fator “C” é avaliado a partir dos mapas referentes aos dois cenários de recarga considerados, sejam eles: Recarga direta e recarga difusa. Para tal, os resultados obtidos nos itens 6.1.1 (Distância até as feições cársticas de recarga), 6.1.2 (Feições superficiais) e 6.1.3 (Declividade e Vegetação) serão utilizados como variáveis de entrada para a obtenção dos mapas finais de cada cenário, e subsequentemente o mapa final do Fator “C” (Concentração de Fluxo).

##### **6.1.4.1. Cenário 1 – Recarga Direta**

Para o mapa de recarga direta foram empregados os resultados dos Itens 6.1.1 (Distância até feições cársticas de recarga) e 6.1.3 (Declividade e Vegetação) em um cruzamento dos mapas que resultou na Figura 44.

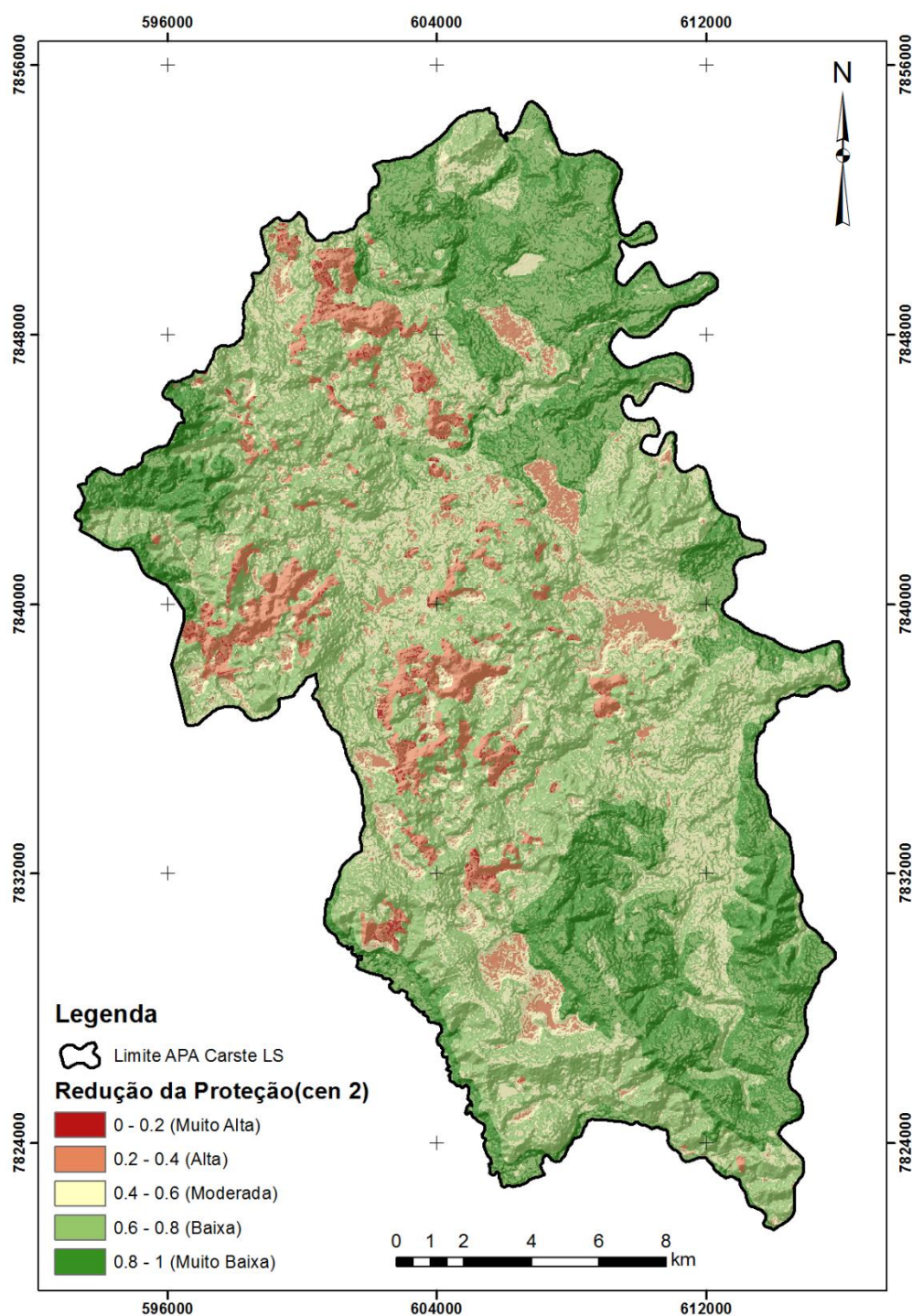
Figura 44: Mapa de redução da proteção relacionado ao cenário 1 – Recarga direta.



#### 6.1.4.2. Cenário 2 – Recarga Difusa

Para o mapa de recarga difusa foram utilizados os resultados dos Itens 6.1.2 (Feições Superficiais) e 6.1.3 (Declividade e Vegetação), em um cruzamento dos mapas que resultou na Figura 45.

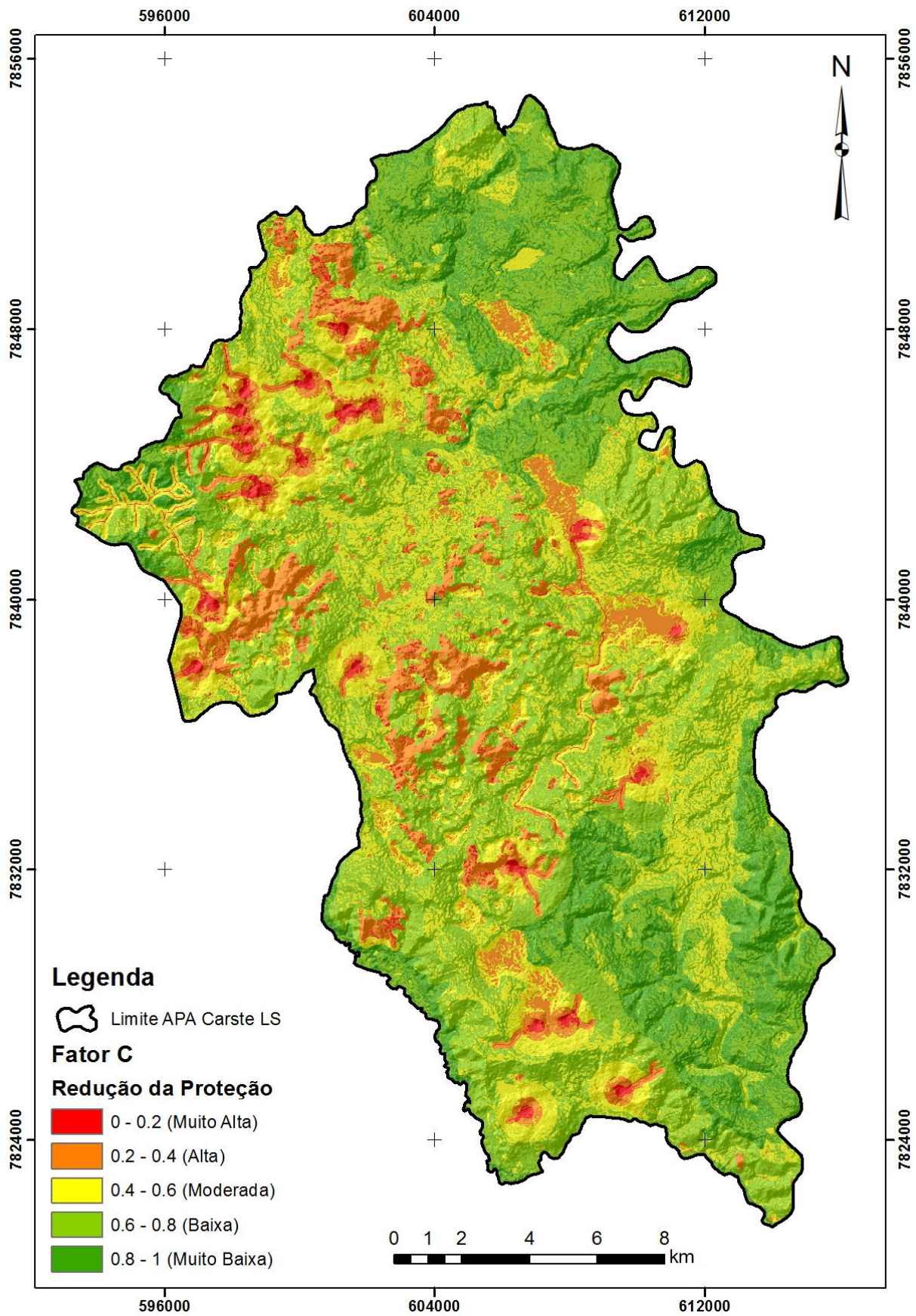
Figura 45: Mapa de redução da proteção do cenário 2 – Recarga difusa.



#### 6.1.4.3. Mapa final do Fator “C”

A sobreposição dos mapas dos dois cenários considerados resultaram no mapa final do Fator C (Figura 46). É digno de nota que, foram considerados os valores de cada cenário correspondentes à uma maior vulnerabilidade (redução de proteção), configurando, assim, uma maior margem de segurança.

Figura 46: Mapa final de redução da proteção para o Fator C (concentração de fluxo).



## 6.2. Fator “O” – Camadas Sobrepostas

A compreensão da geologia local e do comportamento dos solos é de fundamental importância para essa etapa da avaliação já que as condições de infiltração divergem para cada tipo de material de cobertura considerado, logo, têm diferentes inferências na vulnerabilidade.

O fator camadas sobrepostas foi avaliado a partir dos resultados do Item 5.4 (Modelagem da Superfície Freática), imagens de satélite, mapas temáticos e dados de análises de perfil e tradagens de solo.

### 6.2.1. Solos (*Os*)

O subfator “*Os*” corresponde à camada biologicamente mais ativa do solo, que ocorre nas camadas mais superficiais, onde a probabilidade de contato e interação entre contaminantes e micro-organismos é maior. É determinado pelo cruzamento de informações advindas da classificação textural e da espessura do solo (Tabela 32 e Tabela 33).

Tabela 32: Classificação textural do solo segundo método COP.

Classificação Textural do Solo	
Argiloso	> 30% de argila
Siltoso	> 70% de silte
Arenoso	> 70% de areia, e, ≤ 15% de argila
Argilo-Arenoso	Outros Valores

Fonte: Vías *et al.* (2002).

Tabela 33: Valores atribuídos a combinação da espessura e textura do solo.

	Espessura	Classificação Textural			
		Argiloso	Siltoso	Argilo-arenoso	Arenoso
	> 1,0m	5	4	3	2
	0,5 – 1m	4	3	2	1
	< 0,5m	3	2	1	0*

\*: também onde há ausência de solo.

Fonte: Vías *et al.* (2002).

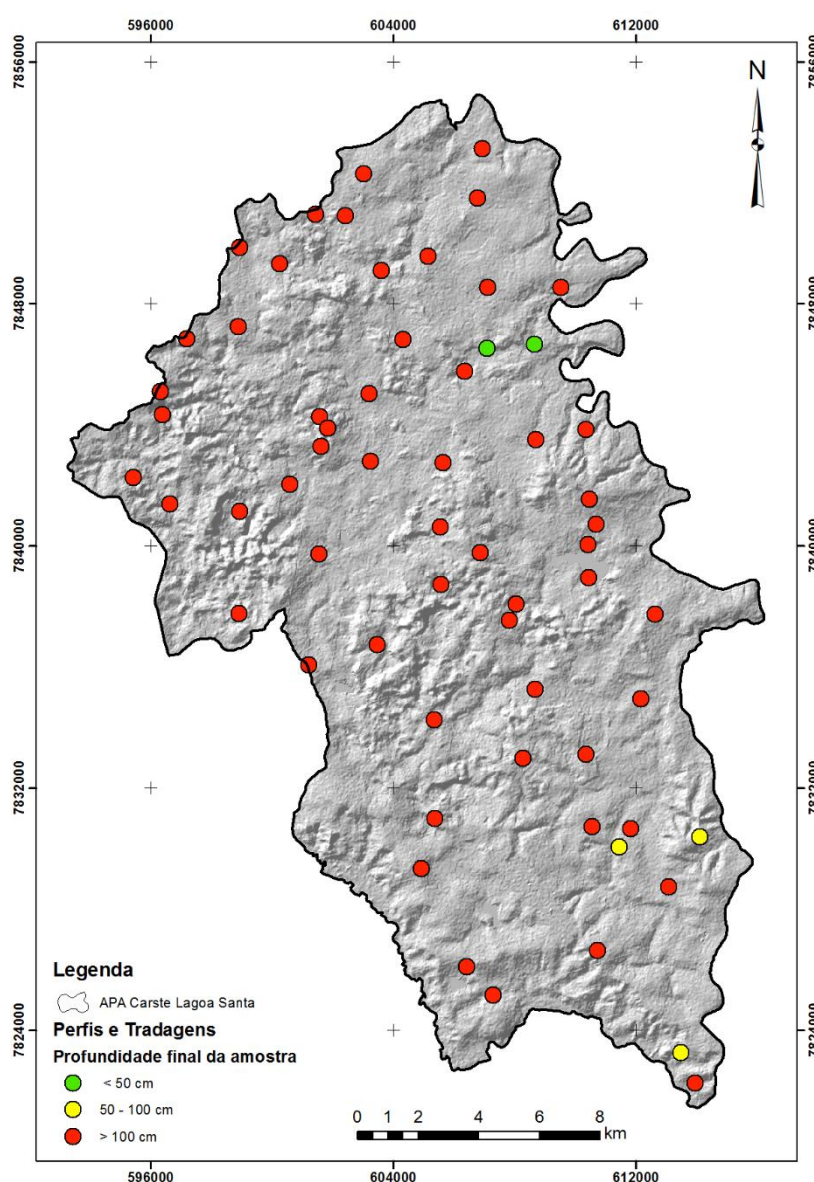
Quanto mais espessa a camada de solo, maior a probabilidade de atenuação física e química de contaminantes que ocorre quando a água percola através do solo. Os valores de pontuação do subfator “*Os*”, ou grau de proteção proporcionado pelo solo, portanto, tendem a aumentar com o aumento da espessura do solo. De forma análoga, a pontuação também cresce à medida que a textura tende a grãos mais finos, pois granulometrias mais finas geralmente apresentam baixa condutividade hidráulica e, portanto, aumentam o tempo de trânsito da água através do solo, além de conterem mais

argila, o que aumenta a capacidade de absorção de contaminantes iônicos, reduzindo a vulnerabilidade do aquífero (Leyland, 2008).

Os dados utilizados para a classificação dessas propriedades do solo foram retirados das fichas de descrição de perfis e tradagens do projeto APA Carste de Lagoa Santa (IBAMA, 1998), encontrados nos anexos do Volume 1 (meio físico) na caracterização pedológica.

No projeto citado, foram descritos 26 perfis de solo, sendo 15 com coleta completa para análise físico química, e em complementação, foram descritas 49 tradagens que, segundo IBAMA (1998), auxiliaram substancialmente não só na classificação destes solos como na melhor definição das unidades de mapeamento. O mapa com a localização os perfis e tradagens é apresentado na Figura 47.

Figura 47: Pontos de amostragem de solos.



Fonte: Modificado de IBAMA (1998).

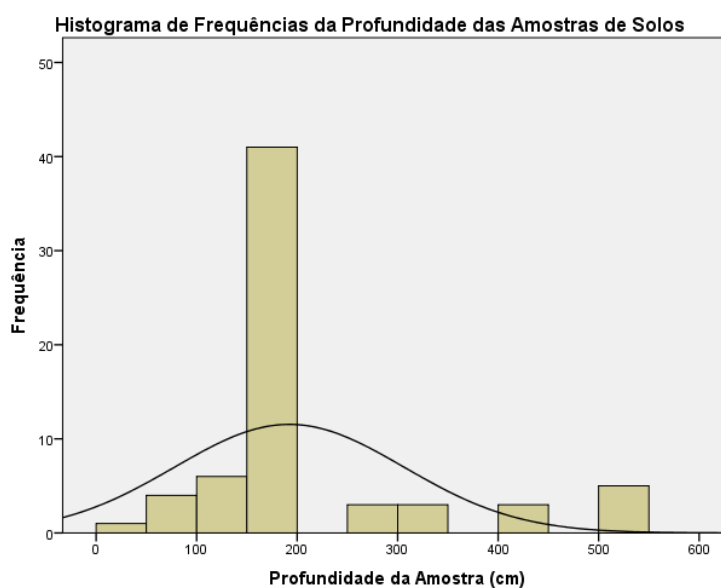
A estimativa de espessura média dos solos foi avaliada através das descrições dos perfis de solos, tradagens, afloramentos rochosos e áreas de mineração retiradas das amostras de campo analisadas por IBAMA (1998) e do banco de dados do projeto VIDA (CPRM, 2003). Os afloramentos rochosos bem como as áreas de mineração foram considerados no mapa final da profundidade de solos como áreas sem a presença de regolito. É importante salientar que, nesse tipo de amostragem, nem todos os perfis e tradagens chegaram ao saprolito, ou seja, a espessura considerada pode representar apenas a espessura mínima. O Gráfico 5 e a Tabela 34 relacionam a profundidade final dos perfis e tradagens analisados.

Tabela 34: Profundidade final dos perfis e tradagens analisados por CPRM, 1998.

Descrição	Nº de dados válidos	Profundidade Final (cm)		
		Média	Mínima	Máxima
Perfis de solo	25	283,08	82	500
Tradagens	37	136,62	30	150

Fonte: Modificado de IBAMA (1998).

Gráfico 5: Histograma de frequências da espessura das amostras de solo.



Os pontos amostrados foram refinados pelo interpolador *IDW* (*Inverse Distance Weight*) ou “inverso das distâncias” (Figura 48), que se mostrou mais adequado às condições reais da área em comparação com outros métodos como a Krigagem Ordinária e o *Natural Neighbor*. O modelo *IDW* baseia-se na dependência espacial, isto é, supõe que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores (Varella *et al.* 2008).

Os dados relativos à classe textural do solo foram extraídos das análises granulométricas de IBAMA (1998), que foram tratados no trabalho citado, segundo a metodologia descrita no Manual de Métodos de Análises de Solos (EMBRAPA, 1979). As amostras avaliadas nessa etapa apontaram

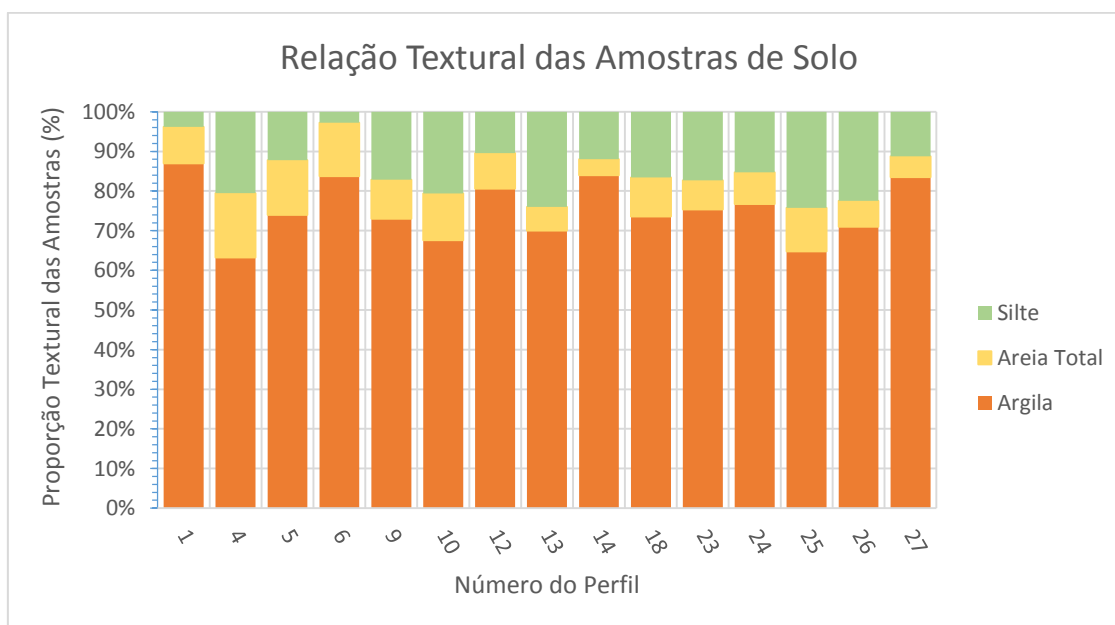
uma alta proporção de argila em todos os perfis considerados, sendo que todos ultrapassaram o limite granulométrico indicado no método COP para o enquadramento de solos como argilosos (>30% de argila), como mostra a Tabela 35, Gráfico 6 e Figura 48.

Tabela 35: Média textural dos horizontes de cada perfil em %.

Perfil	Areia Total	Silte	Argila	Total
1	9.2	3.8	87	100
4	16.25	20.5	63.25	100
5	13.75	12.25	74	100
6	13.5	2.75	83.75	100
9	9.75	17	72.5	99.25
10	11.8	20.6	67.6	100
12	9	10.4	80.6	100
13	6	24	70	100
14	4	12	84	100
18	9.8	16.6	73.6	100
23	7.33	17.33	75.33	100
24	8	15.2	76.4	99.6
25	11	24.25	64.75	100
26	6.5	22.5	71	100
27	5.25	11.25	83.5	100

Fonte: Editado de IBAMA (1998).

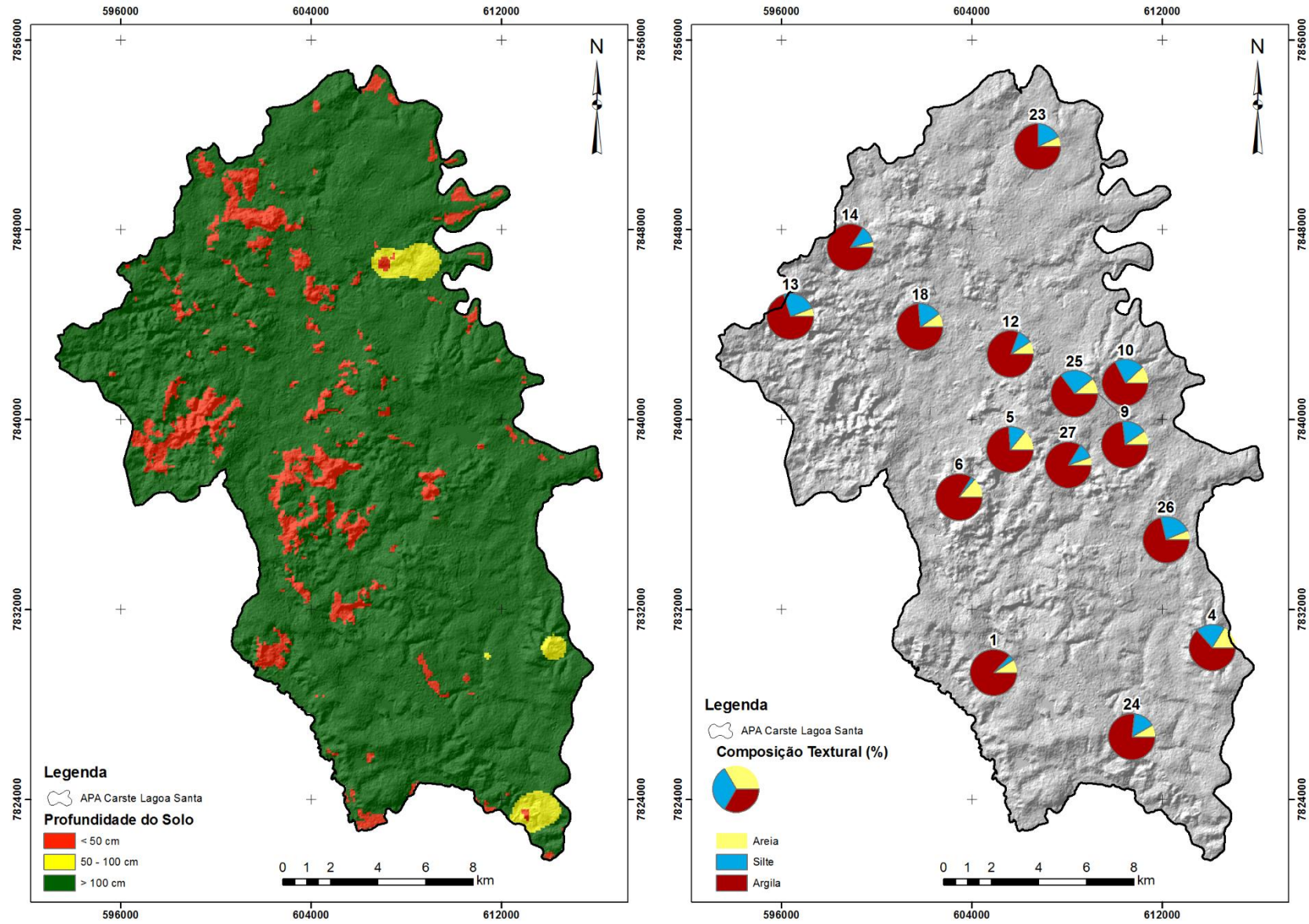
Gráfico 6: Relação textural das amostras de solo.



Fonte: Editado de IBAMA (1998).



Figura 48: Mapa de profundidades do solo (esq.), e de textura do solos (dir.).



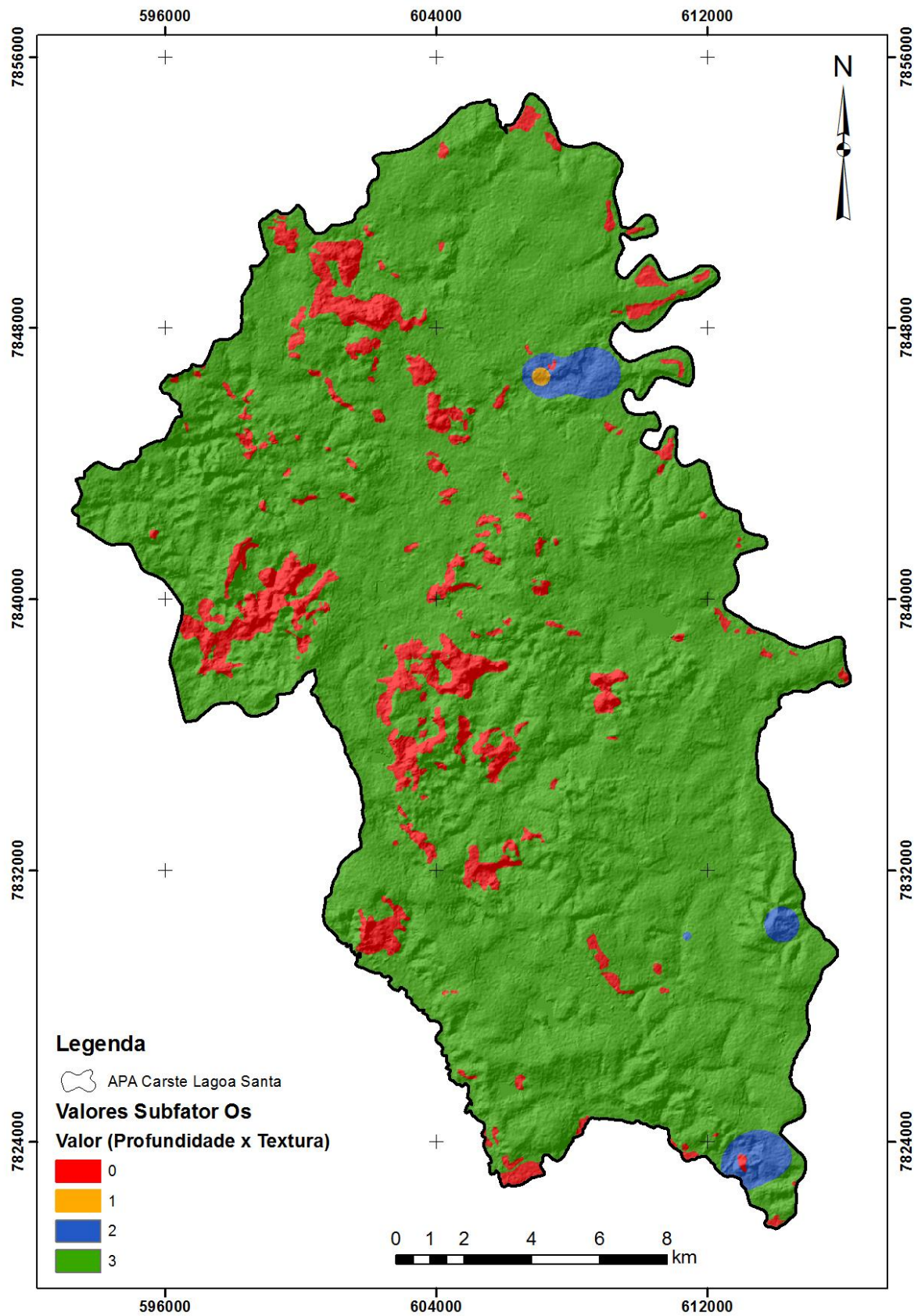
Fonte: Modificado de IBAMA (1998).

Porém, os valores atribuídos às classes texturais de solos por Vías *et al.* (2002) refletem as condições das regiões mediterrâneas de Sierra de Líbar e Torremolinos, situadas no sudeste da Espanha. Tais localidades apresentam solos rasos e pouco estruturados onde a argila se comporta naturalmente como uma camada selante. Segundo Vías *et al.* (2006), os solos são ausentes em grande parte de Sierra de Líbar, e, na região de Torremolinos, os solos são desde ausentes até 70 cm de profundidade.

Assim, visando uma representação mais aproximada do comportamento da infiltração na área de estudo, e conseqüente nível de proteção associado, os solos da área estudada foram classificados como argilo-siltosos apesar de seu enquadramento pelo método como argilosos. Justifica-se essa mudança pelos menores valores de proteção atribuídos a textura argilo-siltosa devido à maior probabilidade de infiltração de água em relação a solos argilosos. Apesar do elevado teor de argila na composição textural dos solos encontrados na APA Carste de Lagoa Santa (IBAMA, 1998), esses se apresentam bem estruturados, bem drenados, geralmente profundos, muito porosos e permeáveis. Logo, a interpretação da argila como uma camada totalmente selante seria pouco representativa nesse contexto.

Os valores de proteção atribuídos às variáveis conjuntas de textura e profundidade são representados no mapa final do subfator “Os” (Figura 49).

Figura 49: Mapa do subfator "Os" - solos



### 6.2.2. Litologia ( $O_L$ )

A avaliação do subfator  $O_L$  consiste no mapeamento das espessuras litológicas ponto a ponto ( $m$ ), assim como a composição e fraturamento das camadas sobrepostas ao nível freático ( $ly$ ). Antes de qualquer avanço em relação à limitação da zona não saturada, a superfície freática da região teve de ser estimada para que esses limites fossem considerados da forma mais correta e uniforme possível na aplicação dos valores de entrada para o subfator  $O_L$ .

O mapa da profundidade da superfície freática foi utilizado como base para a avaliação da espessura da zona não saturada extraindo-se de cada ponto a diferença absoluta entre a superfície real (SRTM) e a superfície potenciométrica, resultando na espessura da zona não saturada ( $m$ ) em cada ponto considerado.

Para a determinação do subfator  $O_L$  os dados gerados no item 5.54 (Modelagem da Superfície Freática) foram utilizados em conjunto com o mapa geológico (CPRM, 2003) na associação das litologias e respectivas profundidades a partir da análise de pixels de 10 x 10 m em uma malha de toda a área de estudo.

Os valores relacionados a litologia são avaliados através de uma tabela que relaciona o tipo de rocha com um valor específico de proteção (Vías *et al.* 2002), logo, foram feitas correlações entre as características dos materiais encontrados na área e das litologias apresentadas na Tabela 36. Após essa análise o valor dado às litologias identificadas é multiplicado pela espessura da camada não saturada nas áreas de influência de cada ponto analisado.

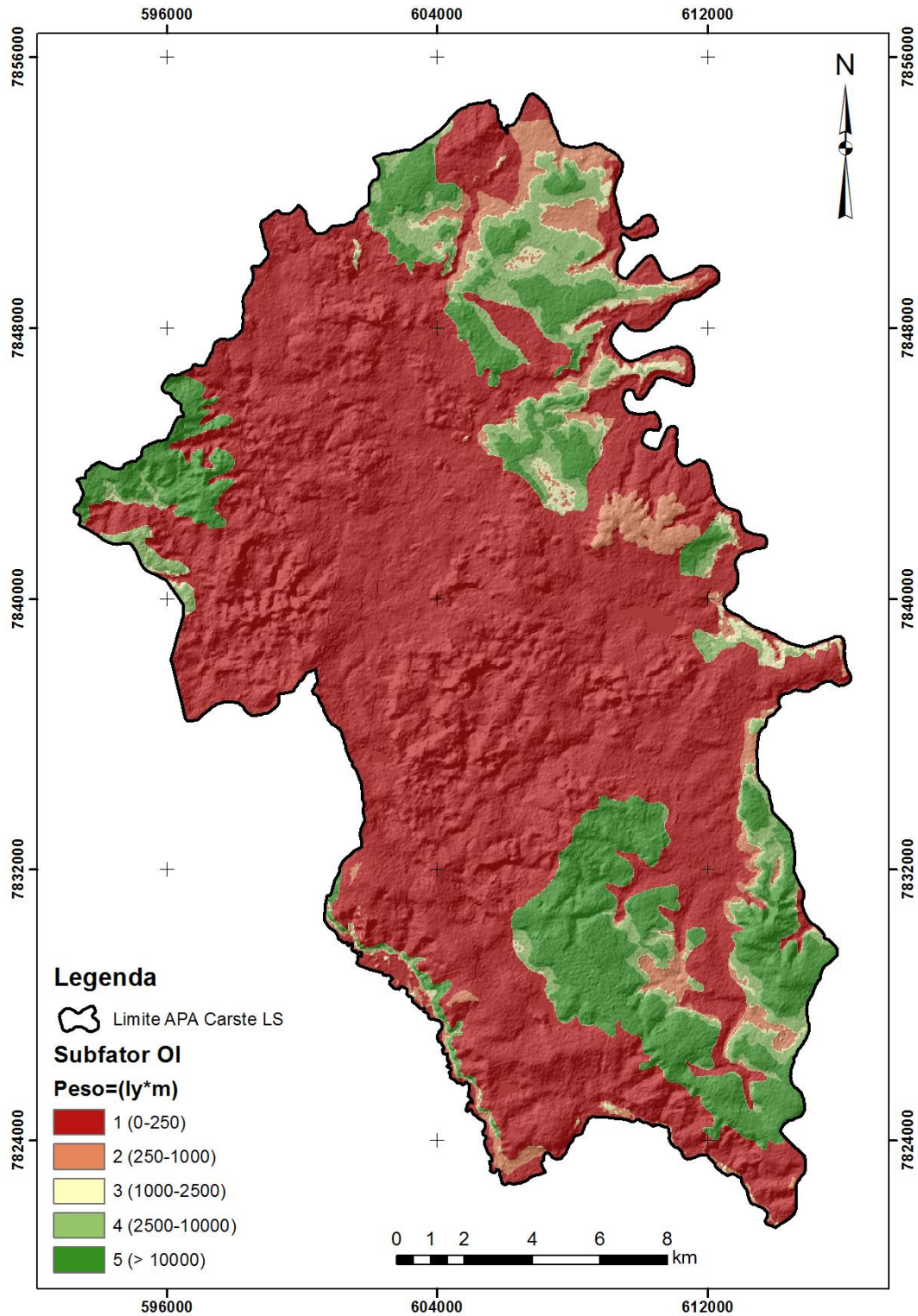
Tabela 36: Descrição e enquadramento das litologias encontradas na área com os valores determinados em Vías *et al.* (2002) para o subfator  $O_L$ .

Unidade litológica	Descrição da Litologia	Divisão Litológica equivalente no método COP	Valor
Depósitos Aluvionares e Terraços terciários	Cascalhos, Cascalho fino, areias e material siltico-argiloso	Areias e Cascalho	10
Formação Serra de Santa Helena	Metassiltitos e metargilitos. Baixo grau de metamorfismo.	Metapelitos fissurados	400
Membro Lagoa Santa	Calcarenitos, secundariamente calcissiltitos e calciruditos. (Abundância de calcita)	Rochas Cársticas	1
Formação Sete Lagoas	Calcissiltitos, subordinadamente calcarenitos e margas (Calcários Impuros)	Carbonatos Fissurados	3
Embasamento	Embasamento Granito gnaissico	Gnaisses, granitóides e migmatitos	Margas, metapelitos não fissurados e rochas ígneas
			1000

O embasamento granito gnáissico recebeu o maior valor de proteção aqui considerado (1000) relacionado a rochas ígneas não fissuradas, e margas. Para os membros da Formação Sete Lagoas, foram adotados os menores valores relativos. O Membro Pedro Leopoldo por sua composição e fraturamento foi enquadrado na categoria dos calcários fissurados (valor 3), já o Membro Lagoa Santa por sua notável pureza e alta carstificação foi associado à categoria das rochas carsticas com valor igual a 1. A Formação Serra de Santa Helena com seu baixo grau de metamorfismo dos metassiltitos e metargilitos ganhou valor de 400, associado a metapelitos fissurados. Os depósitos aluvionares e terraços terciários foram associados a areias e cascalhos com valor correspondente a 10.

Por fim, os valores atribuídos a cada litologia foram multiplicados pela profundidade do ponto considerado em cada camada partindo da superfície do terreno verticalmente até seu contato com a superfície freática (mapa de profundidade do nível freático). O resultado do mapa final do subfator  $O_L$  está representado na Figura 50.

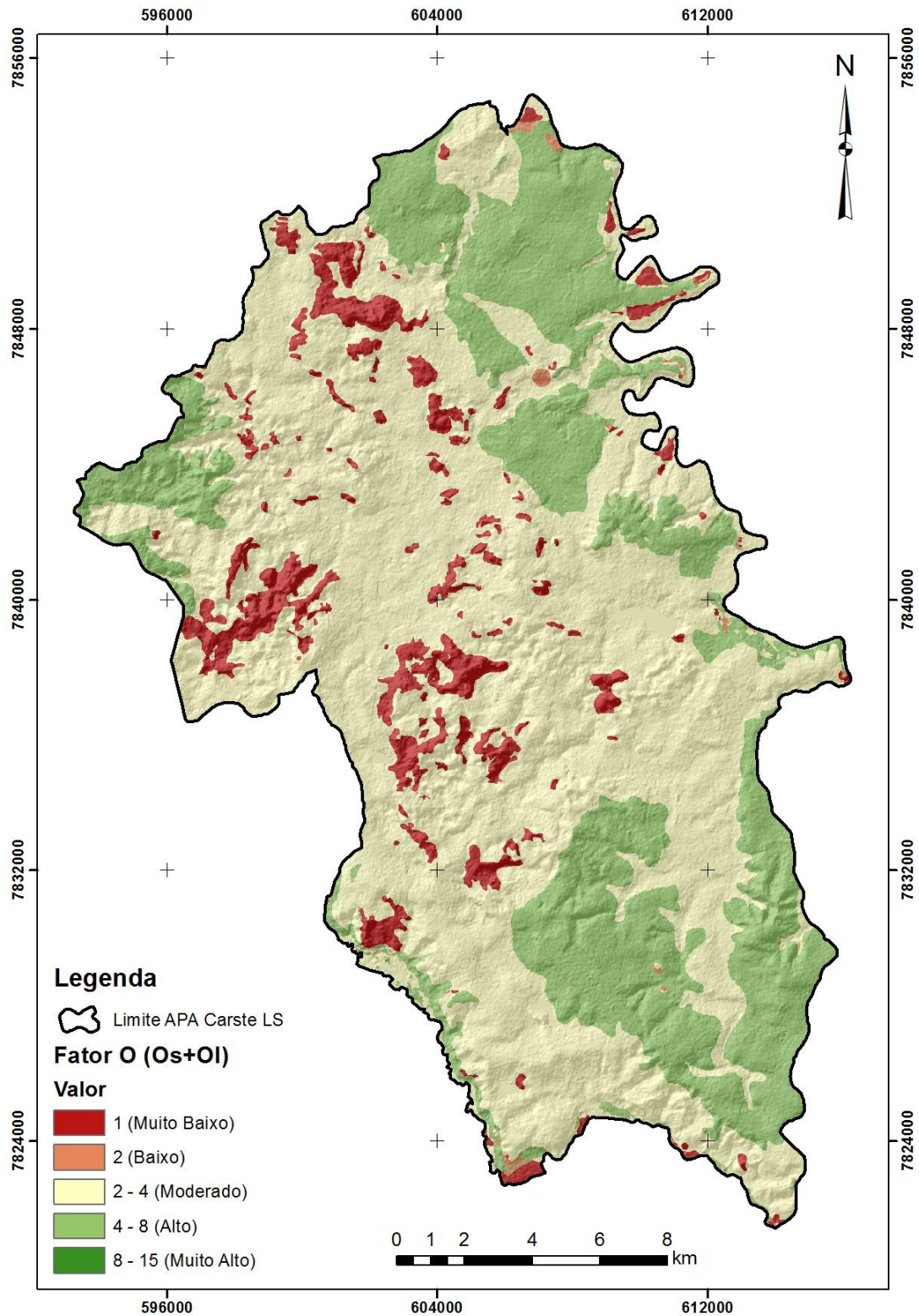
Figura 50: Mapa final do subfator  $O_L$  – Litologia.



### 6.2.3. Cálculo do Fator “O”

O cálculo do fator O é feito pela soma entre os mapas finais dos itens 6.2.1 (Solos –  $O_s$ ) e 6.2.2. (Litologia –  $O_L$ ). O resultado pode ser observado na Figura 51.

Figura 51: Mapa final de proteção para do Fator “O” – camadas sobrepostas.



### 6.3. Fator “P” – Precipitação

O fator “P” foi avaliado a partir de 3 (três) estações pluviométricas cadastradas no banco de dados HidroWeb (ANA, 2014), com distância máxima dos limites da APA carste de Lagoa Santa de 22 km, as quais apresentaram maior consistência de dados para a utilização nesse trabalho. Os dados originais podem ser encontrados na bibliografia citada. No anexo I encontram-se as planilhas das médias anuais (com anos úmidos segundo o método COP assinalados) para aplicação na avaliação dos subfatores  $Pq$  (precipitação) e  $Pi$  (intensidade).

Apesar da disponibilidade dos dados de precipitação até dezembro de 2013, foram empregados os existentes até o ano de 2005, para todas as estações, pois se encontravam consistidos pela ANA. Além disso, os períodos das séries históricas variam entre si, portanto para a padronização das amostras, foram utilizados dados no intervalo de 1974 até 2005 para todas as 3 (três) estações, como mostra a Tabela 37.

Tabela 37: Estações avaliadas para o cálculo do Fator P.

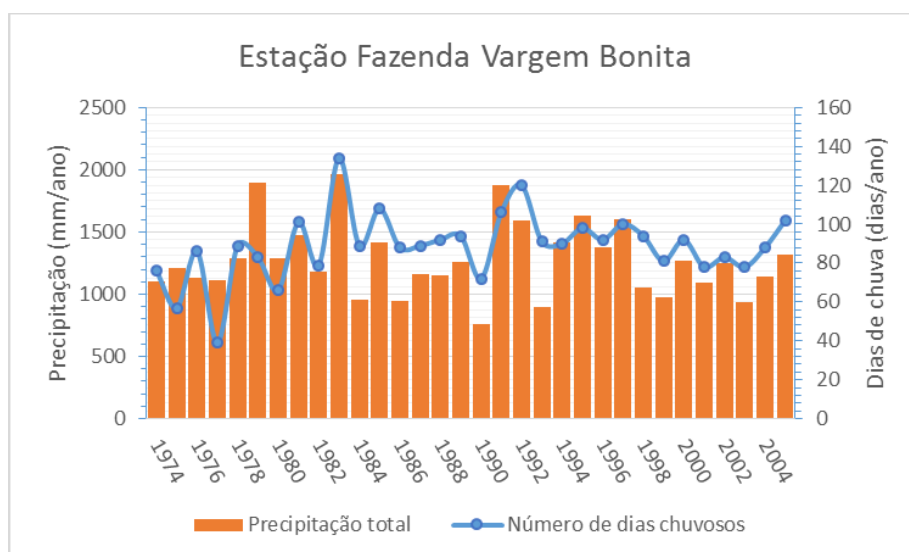
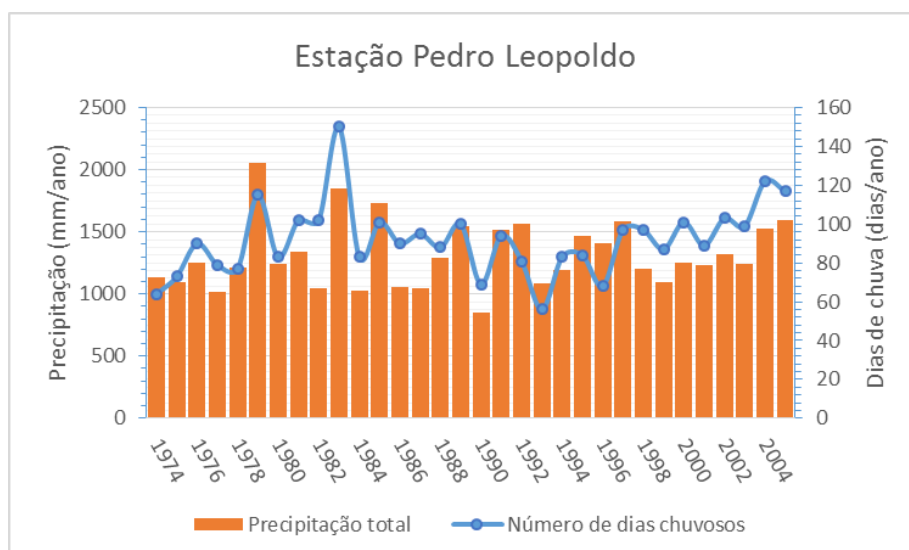
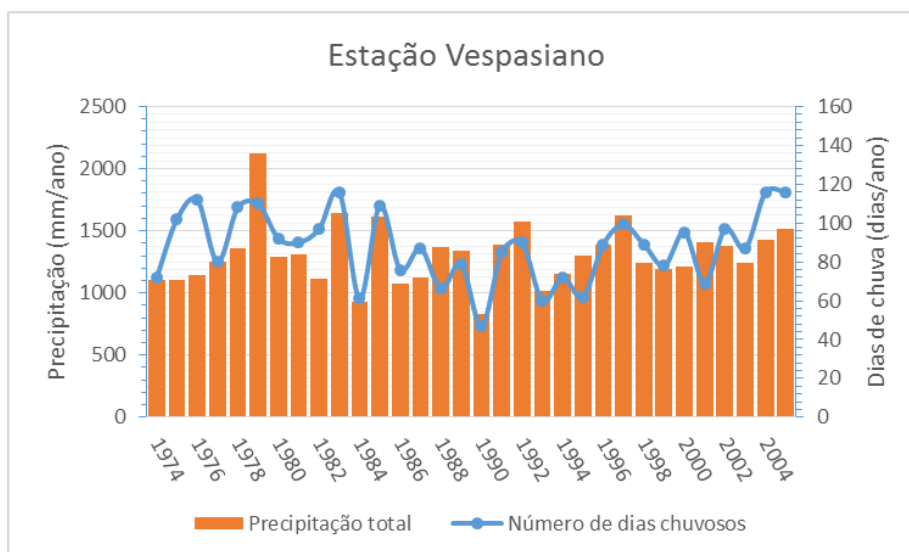
<b>Código ANA</b>	<b>Nome estação</b>	<b>Período da série histórica</b>	<b>Período utilizado (dados consistidos)</b>
01943009	Vespasiano	1941-2013	1974-2005
01944009	Pedro Leopoldo	1941-2013	1974-2005
01944024	Fazenda Vargem Bonita	1961-2013	1974-2005

Fonte: ANA (2014).

Como já mencionado no item 5.1 (Método COP), para determinar os valores referentes ao fator “P” é necessário calcular as médias históricas anuais do período considerado em cada estação pluviométrica, assim como os dias de chuva relatados, já que essas são as variáveis iniciais de entrada para o cálculo dos dois subfatores considerados nessa etapa. A estação Pedro Leopoldo apresentou a maior média de precipitação dentre as 3 estações consideradas com 1.313 mm/ano e 90,6 dias/ano de dias chuvosos, seguida da estação Vespasiano, com 1.310,4 mm/ano e 85,1 dias/ano de dias chuvosos, e a estação Vargem Bonita com 1.272,5 mm/ano e 88,1 dias chuvosos por ano. Os Gráficos 7, 8 e 9 representam os dados de precipitação média anual e os dias de chuvas observadas. No Anexo I encontram-se completas as séries históricas anuais consideradas.



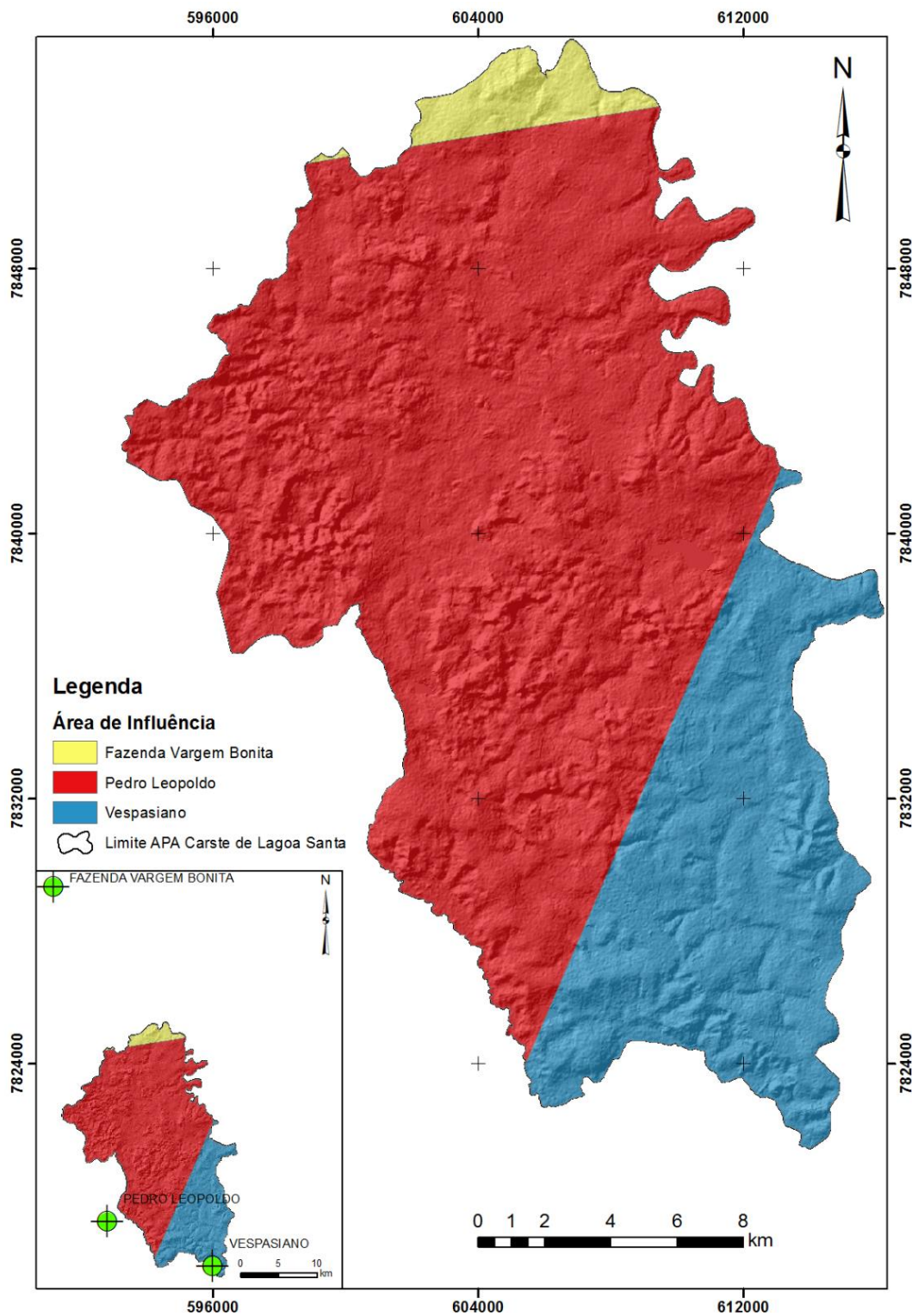
Gráficos 7, 8 e 9: Dados das estações pluviométricas selecionadas.



Fonte: Adaptado de ANA (2014).

A obtenção das áreas sob influência dos postos de monitoramento pluviométrico considerados foi realizada através do método dos polígonos de Thiessen (Figura 52), por intermédio do software *ArcGIS 10*. Polígonos de Thiessen são áreas de “domínio” de um posto pluviométrico. Considera-se que no interior dessas áreas a altura pluviométrica é a mesma do respectivo posto.

Figura 52: Estações Pluviométricas selecionadas e municípios da área de influência.



O polígono de Thiessen que recobre a maior parte da área corresponde a estação Pedro Leopoldo (73,2%), seguido da estação Vespasiano (24%), e, por fim, ao extremo norte da área, a estação fazenda Vargem Bonita, com 2,8% de cobertura (Tabela 38).

Tabela 38: Área de influência das estações pluviométricas, precipitação média e número de dias de chuva.

<b>Código ANA</b>	<b>Nome estação</b>	<b>Área de influência (km<sup>2</sup>)</b>		<b>Precipitação média (mm/ano)</b>	<b>Média anual do número de dias chuvosos (dias/ano)</b>
01943009	Vespasiano	97,44	24%	1310,4	85,1
01944009	Pedro Leopoldo	297,07	73,2%	1313	90,6
01944024	Fazenda Vargem Bonita	11,39	2,8%	1272,5	88,1

### 6.3.1. Precipitação ( $Pq$ )

Com base no método COP, o valor mínimo de precipitação necessário para que um ano seja considerado úmido é calculado somando-se a média anual normal da série histórica mais 15% dessa média. Logo, todos os anos que apresentaram precipitações igual ou superior a esse valor mínimo foram considerados úmidos, a partir dos quais foram dados os valores de redução de proteção indicados no método original. Os anos considerados úmidos por estação pluviométrica estão representados na Tabela 39, e a comparação entre os valores das médias anuais das séries completas e dos anos úmidos, com seus respectivos valores, na Tabela 40.

Tabela 39: Anos considerados úmidos utilizados por estação pluviométrica.

	<b>Estação</b>		
	Vespasiano	Pedro Leopoldo	Fazenda Vargem Bonita
<b>Anos Úmidos</b>	1979	1979	1979
	1983	1983	1981
	1985	1985	1983
	1992	1989	1991
	1997	1991	1995
	2005	1992	1997
		1997	
		2004	
		2005	

Tabela 40: Médias anuais da precipitação e valores atribuídos ao subfator  $P_q$ .

Nome da estação	Precipitação média anual (mm)		
	Série Completa	Anos Úmidos	Valor $P_q$
Vespasiano	1.310,4	1.507,5	0,3
Pedro Leopoldo	1.313	1.578	0,3
Fazenda Vargem Bonita	1.272,5	1.530	0,3

### 6.3.2. Intensidade de Precipitação ( $P_i$ )

A intensidade anual média das precipitações ( $P_i$ ) foi calculada a partir da divisão entre a precipitação média anual dos anos considerados úmidos pelo dia de números chuvosos desses anos relatados nas séries históricas (Tabela 41).

Tabela 41: Variáveis do subfator  $P_i$  e valores de intensidade de precipitação.

Nome da estação	Média anual da precipitação dos anos úmidos (mm/ano)	Média anual do número de dias chuvosos (dias/ano)	Intensidade (mm/dia)	Valor $P_i$
Vespasiano	1.507,5	90,7	16,62	0,4
Pedro Leopoldo	1.578	100,9	15,64	0,4
Fazenda Vargem Bonita	1.530	96,9	15,79	0,4

### 6.3.3. Cálculo do Fator P

As três estações pluviométricas selecionadas e seus respectivos valores referentes aos subfatores supracitados, necessários para o cálculo do fator P, estão sintetizadas na Tabela 42:

Tabela 42: Valores dos subfatores  $P_q$  e  $P_i$ .

Estação Pluviométrica	Subfator $P_q$		Subfator $P_i$	
	Precipitação (mm)	Valor	Precipitação/Intensidade (mm/ano)	Valor
Vespasiano	1.507,5	0,3	16,62	0,4
Pedro Leopoldo	1.578	0,3	15,64	0,4
Fazenda Vargem Bonita	1.530	0,3	15,79	0,4

Em uma área que não atinge escala regional, o regime de precipitação ( $P_q$ ) e sua respectiva intensidade ( $P_i$ ) tendem a reproduzir, por estação, como neste caso, valores relativamente próximos

entre si, logo, todas as estações apresentaram o mesmo valor final para os parâmetros de quantidade e intensidade de precipitações, sendo eles, 0,3 e 0,4, respectivamente.

Aplicando a equação para o valor final do fator P, obtém-se:

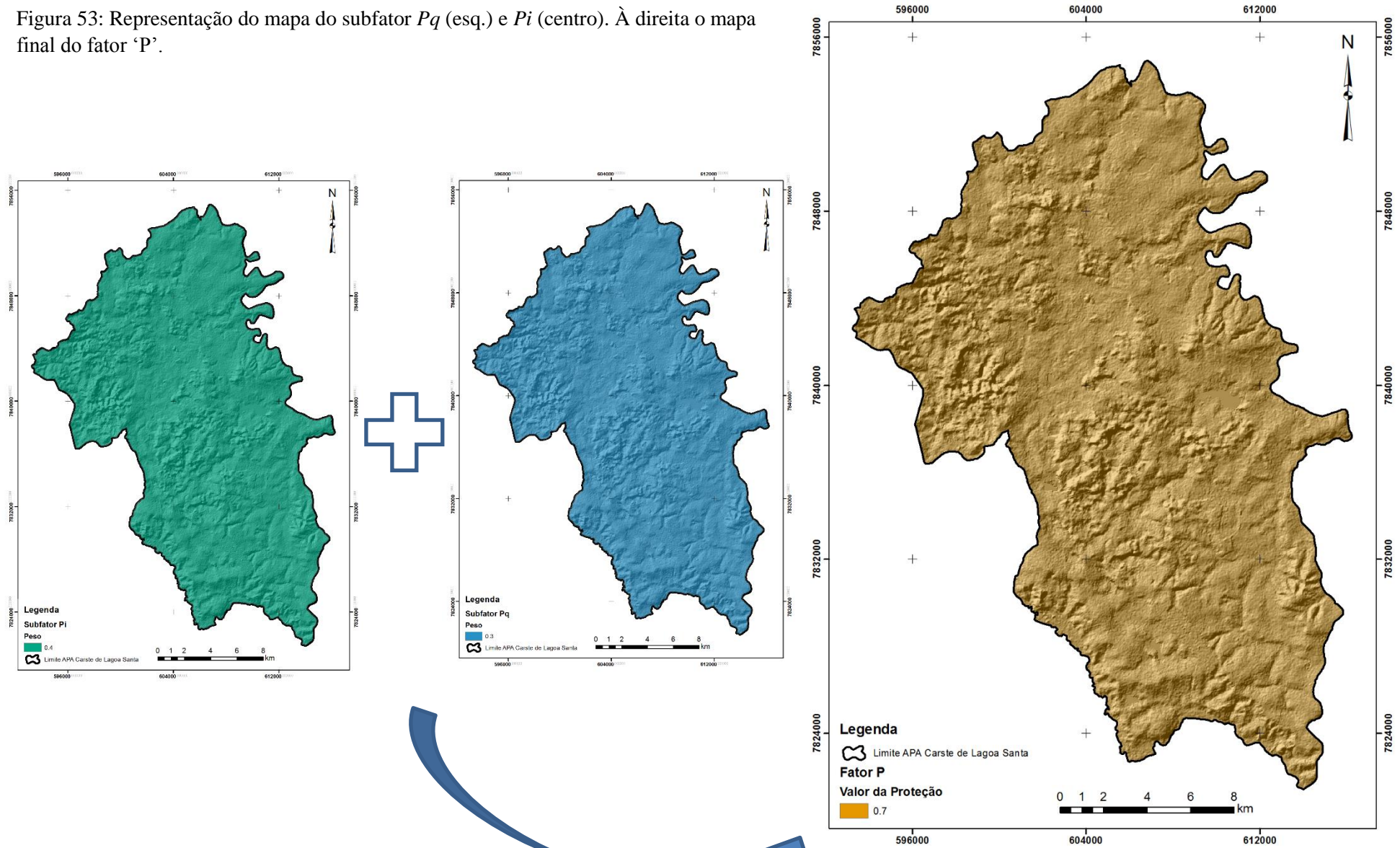
$$P = [P_Q] + [P_I]$$

$$\text{Logo, } P = [0,3 + 0,4]$$

$$P = 0,7$$

Este valor representa uma moderada redução da proteção, segundo Vías *et al.* (2002), vide item 5.1 (Método COP). A Figura 53 representa os mapas dos subfatores  $P_q$  e  $P_i$  e o mapa final do fator P.

Figura 53: Representação do mapa do subfator  $Pq$  (esq.) e  $Pi$  (centro). À direita o mapa final do fator 'P'.



## 7. CÁLCULO DO ÍNDICE COP E MAPA FINAL DA VULNERABILIDADE

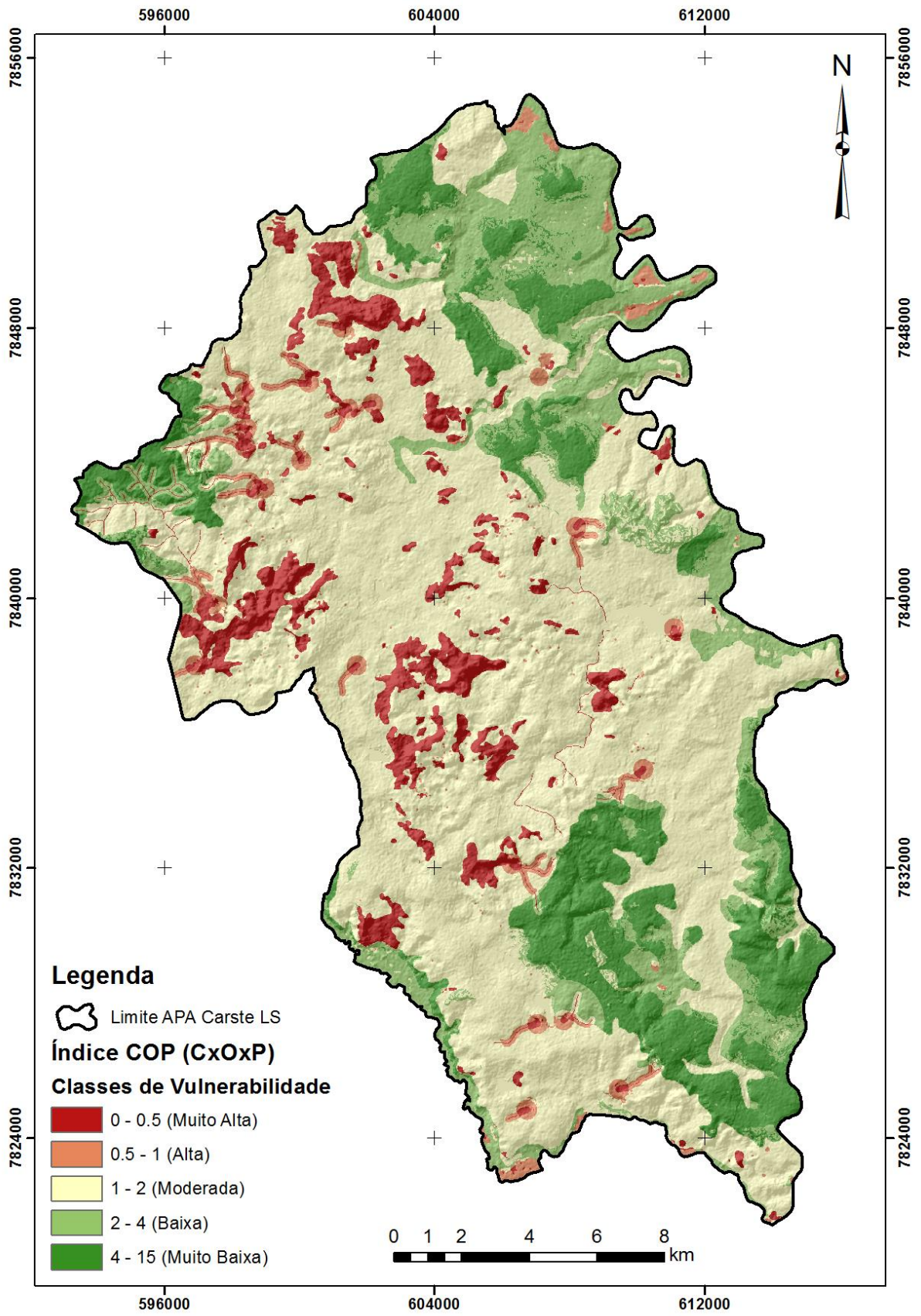
O cálculo final do índice de vulnerabilidade intrínseca pelo método COP, que varia entre um mínimo de 0 e máximo de 15, é feito pela multiplicação por superposição dos mapas resultantes dos fatores C, O e P. Os valores finais do mapa de vulnerabilidade são agrupados em intervalos qualitativos para a interpretação dos resultados (Tabela 43).

Tabela 43: Descrição da vulnerabilidade para os limites do índice COP final.

<b>Descrição da Vulnerabilidade</b>	<b>Limites do Índice COP</b> <i>Vías et al. (2002)</i>	<b>Área de Cobertura na APA</b> <b>Carste de Lagoa Santa</b>
Muito Alta	0- 0,5	7,66%
Alta	0,5-1	3,29%
Moderada	1-2	58,77%
Baixa	2-4	15,78%
Muito Baixa	4-15	14,50%

A Figura 54 mostra o mapa final da vulnerabilidade com os intervalos citados na Tabela 43 com resolução de 10x10m. O mapa em escala 1:50.000 pode ser consultado no Apêndice II.

Figura 54: Mapa final de vulnerabilidade para a APA Carste de Lagoa Santa pelo método COP.





## 8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os métodos utilizados para o mapeamento de dolinas e da vegetação se comportaram de forma procedente onde foram confirmados em campo alguns dos casos mapeados. Entretanto, os resultados da superfície freática foram aceitos com ressalvas enquanto os resultados do modelo básico da geologia não puderam ser utilizados.

Os resultados da interpolação da superfície freática mostraram uma concordância entre as direções preferenciais sudoeste-nordeste do fluxo de água subterrânea para o Rio das Velhas, em conformidade com os resultados de IBAMA (1998), todavia a distribuição escassa de poços em algumas localidades aumentou a chance de erro geostatístico nessas zonas.

O método de identificação semiautomático de depressões via SRTM (Rodrigues, 2011) demonstrou atuação satisfatória no mapeamento de dolinas evidenciada pelos casos especiais encontrados, pelas análises comparativas feitas com as feições anteriormente detectadas por IBAMA (1998) e pela confirmação em campo de 23 feições mapeadas pelo método.

No mapeamento da densidade da vegetação, os limites NDVI utilizados inicialmente com base em estudos como Bitencourt *et al.* (1997) e Lopes *et al.* (2009) não foram representativos na análise de consistência inicial para as classes de vegetação propostas no método COP (Vías *et al.* 2002), logo, foram propostos limites mais adequados para a realidade da área estudada com base no cruzamento das zonas vegetadas inicialmente adotadas, imagens *Google Earth Pro* e com confirmação de 38 localidades em campo.

Quanto aos parâmetros intrínsecos ao método COP, como um todo, deve ser observado que esse método foi criado e aplicado inicialmente na região temperada mediterrânea o que fez com que os parâmetros sugeridos retratassem a realidade da região originalmente estudada. A extensão das áreas testadas por Vías *et al.* (2002) também são dignas de atenção por seu tamanho reduzido.

Para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca da APA Carste de Lagoa Santa foram sugeridas algumas mudanças de enquadramento de parâmetros na classificação dos fatores ponderando as características peculiares observadas no presente trabalho, tais como: a área consideravelmente grande (40 mil ha), as condições climáticas, o desenvolvimento diferencial dos solos e do carste em relação ao observado nos platôs europeus.

A seguir será feita uma avaliação do comportamento dos principais fatores e subfatores e uma proposta de modificação de variáveis para uma melhor adaptação em ambientes cársticos similares ao aqui considerado.

Os subfatores  $O_L$  (Litologia) e  $O_S$  (Solos) conferem valores a camadas sobrepostas ao aquífero (Fator  $O$ ) e atuam intensamente na ponderação do índice final de vulnerabilidade COP. Julgando pela

diferença entre o intemperismo associado a climas semiáridos e subtropicais mediterrâneos (método original) e o clima tropical (APA Carste de Lagoa Santa) pode-se inferir uma diferença substancial no comportamento dos materiais de cobertura, assim como na evolução da carstificação. Partindo desse pressuposto, o subfator  $O_L$  reagiu de forma satisfatória, conseguindo-se enquadrar as litologias encontradas na APA Carste dentro das categorias propostas e segmentadas por Vías *et al.* (2002).

Já o subfator  $O_S$  (Solos), determinante na avaliação do fator  $O$  e com alto poder de alteração no mapa final do índice COP, não portou-se de maneira razoável já que considera um intervalo de 0 até 1m de solo para a profundidade e divide-o ainda por textura. Entretanto na APA Carste encontram-se solos muito profundos podendo chegar, segundo perfis de sondagem, a até 90m de material inconsolidado e teores de argila com valores entre 60 e 87%.

Os solos profundos, que cobrem a maior área, contribuíram para uma diminuição geral da vulnerabilidade, destacando a importância da pedogênese no clima tropical. A litologia também desempenhou um papel importante nos valores do mapa final, especialmente nas classes mais baixas de vulnerabilidade.

O fator  $C$ , concentração de fluxo, sofreu, para a aplicação na APA Carste, duas modificações referentes a parâmetros dos subfatores: distância de influência de feições de recarga direta ( $dh$ ) e classificação de fitofisionomias vegetacionais ( $sv$ ).

No que tange a distância de feições de recarga direta ( $dh$ ), os raios de influência de drenagem interna (ou recarga) de sumidouros foram diminuídos de acordo com Leyland (2008), que propôs novas distâncias para a aplicação na África do Sul, região que se assemelha mais a área de estudo. O raio máximo de 2.400m foi suficiente para abranger a drenagem dos sumidouros da área apesar das baixas faixas de declividade identificadas.

Os valores da vegetação no subfator declividade e vegetação ( $sv$ ) também foram redistribuídos, de acordo com as classes propostas por Leyland (2008). A variedade fisionômica da vegetação brasileira faz com que haja a necessidade de uma maior diferenciação de classes para que as situações de proteção sejam fielmente consideradas. Salienta-se que o valor do subfator  $sv$  no mapa final de vulnerabilidade é pequeno, porém quanto maior for o conhecimento das condições de infiltração influenciadas pela vegetação encontradas nas áreas de aplicação do método COP, maior será seu refino, e, portanto, melhores os resultados.

Para o fator  $P$  (Precipitação) não houve necessidade de nenhuma adequação ou modificação de parâmetros já que as condições propostas por Vías *et al.* (2002), se fizeram apropriadas, tendo em vista a grande amplitude das faixas dos valores de precipitação considerados.

Os resultados do mapa final de vulnerabilidade intrínseca foram categorizados em cinco classes de acordo com os limites propostos por Vias *et al.* (2002), sendo eles: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

O índice COP revelou que 7,66% da área de estudo foi enquadrada como altamente vulnerável à contaminação das águas subterrâneas (vulnerabilidade muito alta). Estas áreas são representadas principalmente por zonas com feições cársticas de recarga direta (e.g. cavernas, sumidouros e vales cegos), lagoas desenvolvidas sobre dolinas e afloramentos de calcário. Essas áreas merecem atenção especial já que sua má utilização pode causar mudanças catastróficas na qualidade da água. A facilidade de infiltração observada em afloramentos de calcário, particularmente em calcário puro, é devido ao alto desenvolvimento do epicarste e consequente aumento da permeabilidade e percolação da água.

As áreas associadas com limites de alta vulnerabilidade abrangem 3,29% da área total e também recebem influência de feições cársticas de recarga direta, mas em menor escala. Dolinas e cavernas também foram classificadas como altamente vulneráveis dependendo de outros parâmetros, tais como litologia e vegetação.

A maior área de cobertura corresponde à vulnerabilidade moderada, cuja extensão recobre 58,77% da área. É composto por calcários da Formação Sete Lagoas cobertos por solos espessos, e planícies de inundação que se estendam mais de 100m de rios associados a sumidouros.

As zonas de baixa vulnerabilidade corresponderam a 15,78% da área de estudo. São representadas principalmente por metapelitos fissurados da formação Serra de Santa Helena influenciados fortemente pelos subfator  $O_L$  (Litologia) e o cenário 2 do Fator  $C$  (Concentração de Fluxo).

As regiões enquadradas como sendo de muito baixa vulnerabilidade à contaminação representam 14,5% da área total, onde o fator  $C$  tem pouca influência, e são compostas principalmente por rochas pelíticas da Formação Serra de Santa Helena e expressivas áreas de afloramento do embasamento.

O mapa final da vulnerabilidade pode ainda ser analisado por sua cobertura no contexto do zoneamento ambiental da APA Carste de Lagoa Santa. Para tal, foram examinadas as classes de maior vulnerabilidade (muito alta e alta) dentro de cada zona ambiental proposta por IBAMA (1998). As zonas ambientais que mais concentram valores de muito alta vulnerabilidade são ZPPNC (48,12% do total de dados de muito alta vulnerabilidade), ZCPD (27,68%) e ZDUI (14,8%); da mesma forma as zonas que mais concentram valores de alta vulnerabilidade são: ZPPNC (51,36%), ZCEAM (16,52%) e ZPPC (13,18%). Nota-se que as zonas de maior proteção (ZPPNC e ZPPC) não detêm a grande

maioria dos valores associados aos mais altos níveis de vulnerabilidade, conseqüentemente zonas de conservação (menos restritivas) somam boa parte desses valores, assim sendo, áreas muito vulneráveis podem estar sendo afetadas pelo desenvolvimento antrópico influenciado pelo zoneamento ambiental.

## 9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os métodos utilizados no preparo das variáveis de entrada aplicadas na avaliação da vulnerabilidade (Mapeamento semiautomático de dolinas; Identificação de áreas com vegetação representativa; e Modelagem da superfície freática) mostraram-se funcionais para os propósitos requeridos enquanto os resultados do modelo básico geológico não foram suficientemente representativos para serem utilizados. Recomenda-se para a modelagem da superfície freática o adensamento de amostras, principalmente na região nordeste, quando possível, assim como a utilização de traçadores para a confirmação do direcionamento dos fluxos reais. Quanto ao mapeamento semiautomático de dolinas propõe-se a checagem em campo de um número maior de feições para confirmar a plena consistência do método.

A metodologia COP, adotada para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca no aquífero livre da área de proteção ambiental Carste de Lagoa Santa, provou ser aplicável no contexto brasileiro com resultados bem coerentes. As zonas de vulnerabilidade podem ser calculadas de acordo com o tabelas expostas em Vias *et al.* (2002), Zwahlen (2003) e Vías *et al.* (2006) utilizando como dados de entrada estudos básicos disponíveis para a maioria das regiões. Alguns parâmetros como o solo e a vegetação podem precisar de avaliação especial para a aplicação em áreas semelhantes a deste estudo.

Sendo assim, é plausível considerar, para estudos futuros, uma mudança de valores ou classes no subfator  $O_s$  (Solos), fazendo avaliações *in situ* de permeabilidade (infiltração) em solos de mesma classificação em profundidades diferentes em áreas cársticas piloto de climas diferentes. Uma indicação proposta pelo autor seria a comparação entre as características dos solos da região da APA Carste de Lagoa Santa e a região do Irecê na Bahia, ambos com estudos de vulnerabilidade pelo método COP. O autor sugere ainda, estudos para a confirmação ou redefinição dos parâmetros do subfator  $sv$  (Declividade e Vegetação).

Para um eventual ajuste dos parâmetros de entrada do método COP em zonas tropicais recomenda-se exercícios de sensibilidade, variando-se os parâmetros mais subjetivos e avaliando-se os resultados. Incluem-se aqui as precisões referentes às mudanças climáticas, profundidade de solos e crescimento populacional. Salienta-se que vários parâmetros podem ser fortemente alterados pelo adensamento populacional, por exemplo a impermeabilização do solo por grandes obras, mineração e expansão urbana, ou seja, atividades antrópicas alterando as características dos parâmetros de entrada.

Os resultados da aplicação do método COP na APA Carste de Lagoa Santa revelaram que 10,95% da área estudada foi enquadrada em zonas de muito alta e alta vulnerabilidade associadas a feições com características de alta absorção de água, tais como: sumidouros, vales cegos e

afloramentos de calcário. Cavernas e dolinas foram classificados como altamente vulneráveis em alguns casos. Os órgãos gestores devem prestar atenção especial a essas zonas, devido à alta vulnerabilidade decorrente da larga interação entre a superfície e água subterrânea.

Além disso, a relação entre a cobertura de cada classe de vulnerabilidade e os limites do zoneamento ambiental da APA Carste de Lagoa Santa (IBAMA,1998) indica uma associação de zonas menos restritivas à áreas consideradas de alta e muito alta vulnerabilidade. Nesses casos recomenda-se uma análise dos órgãos gestores para o risco de contaminação de águas subterrâneas provenientes dessas regiões. As zonas de proteção podem ser reconsideradas em função das formas de uso e ocupação dos terrenos e do potencial de degradação da qualidade da água superficial e subterrânea.

A avaliação da vulnerabilidade intrínseca de um aquífero é considerada uma ação preventiva, assim, um mapa de vulnerabilidade não pode ser considerado como um elemento isolado, mas deve ser compreendido como parte de um sistema integrado em um esquema regional de proteção das águas subterrâneas.

Estudos futuros podem contemplar potenciais fontes de contaminação das águas subterrâneas gerando um mapa de ameaças para a avaliação de risco sobreposto ao mapa de vulnerabilidade, tais como: contaminação pontual (e.g. fossas sépticas, mineração, indústrias e aeroporto internacional Tancredo Neves) e contaminação difusa (atividades agrícolas e drenagem urbana), além da expansão populacional. O valor econômico, social ou ecológico da água pode ser utilizado como critério adicional para esta avaliação.

A validação do resultado final de um mapa de vulnerabilidade em ambiente cárstico é recomendada. Pode ser feita, segundo Goldscheider *et al.* (2001), espalhando diferentes traçadores na superfície do terreno (origem) e observar sua presença posterior em uma surgência (alvo). A taxa de tempo de viagem, concentração e recuperação dos traçadores podem ser utilizados para validar o mapa de vulnerabilidade. A Ação Européia COST 620 também afirmou a necessidade de validar mapas de vulnerabilidade e propôs diferentes técnicas de como isso poderia ser feito (Zwahlen, 2003).

Finalmente, o mapa final da vulnerabilidade intrínseca gerado para a APA Carste de Lagoa Santa em escala 1:50.000 pode ser usado como subsídio indicativo para a locação de poços no projeto em desenvolvimento para o monitoramento dos aquíferos da área, em planos de gestão territorial, e também como base para futuros estudos, tanto regionais, quanto intrínsecos ao método de vulnerabilidade. Indica-se ainda a validação e atualização do mapa quando possível.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab'Saber, A. N. (1977). *Os domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação*. São Paulo: Instituto de Geografia – USP.
- Albinet, M., & Margat, J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bulletin du BRGM*, 3(4), pp. 13-22.
- Alexandrino, C., & Hamza, V. (11 de 2011). Estrutura Termal da Litosfera nos Segmentos Cratônicos de Salvador e São Francisco. *RCTVM*, pp. 58-73.
- Alkmim, F., BRITO NEVES, B., & ALVES, J. (1993). Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco - uma revisão. In: Dominguez, J.M.L. & Misi, A. (ed.) 1993. O Cráton do São Francisco. *Reunião Preparatória para o II Simpósio Sobre o Cráton do São Francisco*, 45-62.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. H., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. Oklahoma: US EPA Report 600/2-87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory.
- Almeida, F. d. (1977). *O cráton do São Francisco*. São Paulo: Revista Brasileira de Geociências.
- Amâncio, C. E. (2007). *Precipitação de CaCO<sub>3</sub> em algas marinhas calcárias e balanço de CO<sub>2</sub> atmosférico: os depósitos calcários marinhos podem atuar como reservas planetárias de carbono?* USP. São Paulo: C.E.A.
- ANA. (2010). *Agência Nacional de Águas*. (ANA; Engecorps; Cobrape) Acesso em 05 de 10 de 2013, disponível em <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/downloads/atlas/Resumo%20Executivo/Atlas%20Brasil%20-%20Volume%201%20-%20Panorama%20Nacional.pdf>
- ANA. (2014). *HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas*. Acesso em 21 de 04 de 2014, disponível em AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil): <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>
- Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de acuíferos. 4, 85-103.
- Baeta, A. M. (2011). *Os grafismos rupestres e suas unidades estilísticas no carste de Lagoa Santa e Serra do Cipó - MG*. São Paulo: USP - Museu de Arqueologia e Etnologia (MAE).
- Baptista, M. C. (2004). *ESTRATIGRAFIA E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA REGIÃO DE LAGOA FORMOSA (MG)*. Belo Horizonte: IGC - UFMG.
- Berbert-Born, M. (2002). Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. v.01: 415-430p.

- Bitencourt, M., Mesquita Jr, H., Mantovani, W., Batalha, M., & Pivello, V. (1997). Identificação de Fisionomias de Cerrado com Imagem Índice de Vegetação. *3º Congresso de Ecologia do Brasil*.
- Bonacci, O. (1987). *Karst hydrology with special references to the Dinaric karst* (Vol. 184). Berlin: Springer Verlag.
- Borges et. al., L. (2004). Inventário de fragmentos florestais nativas e propostas para seu manejo e o da paisagem. *10*(1), pp. 22-38.
- BRASIL. (1986). *Deliberação Normativa COPAM Nº 10, de 16 de Dezembro de 1986 – Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de águas, e dá outras providências*. Brasília.
- BRASIL. (12 de 12 de 2011). *PORTARIA Nº 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011, Ministério da Saúde*,. (Ministério da Saúde) Acesso em 16 de 04 de 2014, disponível em [http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)
- Cartelle, C., Habuhid, V., Ferreira, M., & Ferreira, R. (1998). *APA Carste de Lagoa Santa - Patrimônio Espeleológico, Histórico e Cultural*. Belo Horizonte (Série APA Carste de Lagoa Santa, volume III): CPRM/IBAMA.
- Carvalho, P. (1995). *O cerrado de Lagoa Santa: transformações e a percepção do homem*. Belo Horizonte: Univ. Fed. de Minas Gerais/UFMG.
- CECAV. (2014). *Base de dados Geoespacializados das Cavernas do Brasil*. (IMCBio) Acesso em 12 de 05 de 2014, disponível em Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/mapas.html>
- CETEC, F. C. (1984). *studos integrados de recursos naturais - Bacia do Alto São Francisco e parte central da área mineira da SUDENE: hidrologia superficial*. 1984: CETEC.
- Christofolletti, A. (1980). *Geomorfologia*. São Paulo: Edgard Blucher.
- Civita, M., & De Maio, M. (1997). *SINTACS Un sistema paramétrico per la valutazione e la cartografia per la valutazione della vulnerabilit`a degli acquiferi all'inquinamento, Metodologia e automazione*. Bologna: Ed. Pitagora - 191p.
- CPRM. (2014). *CPRM - Serviço Geológico do Brasil*. Acesso em 10 de 02 de 2014, disponível em SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas: [http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa\\_complexa.php](http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php)
- CPRM, C. d. (2003). *Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes e Funilândia*,



- Minas Gerais - relatório final, escala 1:50.000.* José Heleno Ribeiro, Manoel P. Tuller, André D. Filho, Atahualpa V. Padilha, Valéria C. Córdoba. Belo Horizonte: CPRM.
- Cvijić, J. (1893). *Das Karstphänomen, Geographische Abhandlungen* (Vol. 5). E. Holzel: Wien.
- Darnault, C. (2008). *Overexploitation and contamination of shared groundwater resources*. B.V.: Springer Science+business media .
- Doerfliger, N. (1996). *Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multi-attribute vulnerability mapping (EPIK method)*. Faculty of Sciences. Neuchâtel: Neuchâtel University.
- Doerfliger, N., & Zwahlen, F. (1995). EPIK: a new method for outlining of protection areas in karst environment. Em G. G., & J. I. (Ed.), *Proceedings 5th International symposium and field seminar on karst waters and environmental impacts* (pp. 117-123). Rotterdam: Antalya.
- Doerfliger, N., & Zwahlen, F. (1997). EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. Rotterdam: in: International symposium and field seminar on "karst waters and environmental impacts".
- Doerfliger, N., & Zwahlen, F. (1998). *Groundwater Vulnerability mapping in karst regions (EPIK)*. Bern: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL).
- Doerfliger, N., Jeannin, P., & Zwahlen, F. (1999). Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* 39, 165-176.
- Duarte, Y. A., Bautista, F., Mendoza, M. E., & Delgado, C. (2013). Vulnerabilidade y riesgo de contaminación de acuíferos karsticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(2), 243-263.
- EMBRAPA. (1988). *Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento: normas em uso*. SNLCS, Rio de Janeiro.
- EMBRAPA. (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Embrapa, Rio de Janeiro.
- EMBRAPA, E. B. (1979). *Manual de métodos de análise de solo*. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- EMBRAPA, E. B. (2013). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (Vol. 3.ed). Brasília: EMBRAPA.
- EMBRAPA. (2011). *Caracterização Climática das Séries Temporais de Temperatura e Precipitação Pluvial em Sete Lagoas, MG*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Milho e Sorgo - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Sete Lagoas.

- Feitosa et al, F. (2008). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações* (Vol. 3). Rio de Janeiro: CPRM: LABHID.
- Feitosa et al, F. A. (2008). *Hidrogeologia conceitos e aplicações*. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID-UFPE. 812p.
- Ford, D., & Williams, P. (1989). *Karst Geomorphology and Hydrology* (1 ed.). London: Chapman & Hall.
- Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst hydrology and geomorphology*. London: Wiley Chichester.
- Foster, S. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy*. Noordwijk: In: International conference of vulnerability os soil and groundwater to pollutants.
- Foster, S., & Hirata, R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: a methodology based on available data. (p. 81p). Lima: WHO-PAHO; HPE-CEPIS.
- Galvão, P. H. (2015). *Modelo hidrogeologico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas*. São Paulo: Igc/ USP.
- Goldscheider, N. (2005). Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany. 4.
- Goldscheider, N., & Drew, D. (2007). *Methods in Karst Hydrogeology* (Vol. 1). (I. A. Hydrogeologists, Ed.) London: Taylor & Francis.
- Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S., & Hotzl, H. (2000). The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Z. Angew Geology*, 157-166.
- Guareschi, V. D. (2012). *FEIÇÕES DE CARSTE SOBRE A FORMAÇÃO SERRA GERAL NO MUNICÍPIO DE SÃO MARTINHO DA SERRA - RS*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Guerra, A. (1993). *Dicionário geológico – geomorfológico* (Vol. 8). Rio de Janeiro: IBGE.
- Hollingsworth, E. (2009). *KARST REGIONS OF THE WORLD (KROW)—POPULATING GLOBAL KARST DATASETS AND GENERATING MAPS TO ADVANCE THE UNDERSTANDING OF KARST OCCURRENCE AND PROTECTION OF KARST SPECIES AND HABITATS WORLDWIDE*. University of Arkansas. Msc Thesis.
- IBAMA. (17 de 12 de 1997). Instrução normativa nº1, de 17 de dezembro de 1997. Estabelece normas de ocupação e uso na APA Carste de Lagoa Santa, Estado de Minas Gerais.
- IBAMA, I. B. (1998). *Série APA Carste de Lagoa Santa - MG*. Belo Horizonte: IBAMA/ CPRM - GERIDE.

- IBGE, I. B. (2006). *Mapa de unidades de relevo do Brasil. Escala 1:5.000.000*. Brasília: IBGE.
- IEF. (2010). *Plano de Manejo do Parque Estadual do Sumidouro*. INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO - SEMAD, Belo Horizonte.
- INMET. (2014). *Instituto Nacional de Meteorologia - Estações convencionais*. Acesso em 12 de 05 de 2014, disponível em [http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede\\_estacoes\\_conv\\_graf](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_conv_graf)
- INPE. (2014). *TOPODATA - Banco de dados geomorfológicos do Brasil*. Acesso em 14 de 04 de 2014, disponível em Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>
- Jennings, J. (1985). *Karst Geomorphology*. Glasgow: Basil Blackwell.
- Kohler, H. (1989). *Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa-MG*. FFLCH/USP, São Paulo.
- Legrand, H. (1964). System for evaluating contamination potencial of some waste sites. *Journal American Water Works Association*, 56, pp. 959-974.
- Leyland, R. (2008). *Vulnerability mapping in Karst terrains, exemplified in the wider Cradle of Humankind World Heritage Site* (Vols. Dissertation for the degree Magister Scientia - Department of Geology). Pretoria: University of Pretoria, South Africa.
- Lino, C. (2001). *Cavernas – O fascinante Brasil Subterrâneo*. São Paulo: Gaia.
- Lladó, N. L. (1970). *Fundamentos de hidrogeologia cárstica*. Madrid: Editorial Blume.
- Lopes, G. d., Ribeiro, C., & Silva, W. (2009). Mapeamento das fitofisionomias de cerrado da Reserva Biológica da Contagem, DF, por meio de sensoriamento remoto. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*.
- LOUREIRO, C. d. (2003). *Relatório final dos estudos hidrogeológicos na área da Mina Lapa Vermelha, Lagoa Santa/MG: Estudos de rebaixamento do nível d'água do aquífero carbonático*. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni. 91p.
- Machado, D. A. (2011). *CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E VULNERABILIDADE NATURAL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO ENTORNO DO CENTRO NACIONAL DE PESQUISA MILHO E SORGO - SETE LAGOAS/MG*. Belo Horizonte: DESA - UFMG.
- Maia, P. H., Cruz, M. J., & Rodrigues, R. S. (2003). Modelagem da vulnerabilidade dos aquíferos no município de Aracatu - Sudoeste do estado da Bahia. *I(17)*, 53-60.
- Margat, J. (1968). Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution. *Bases de la cartographie*.

- Maupin, M., Kenny, J., Hutson, S., Lovelace, J., Barber, N., & Linsey, K. (2014). *Estimated use of water in the United States in 2010*. U.S. Geological Survey Circular 1405. Fonte: <http://dx.doi.org/10.3133/cir1405>
- McKergow, L. A., Weaver, D. M., Prosser, I. P., Grayson, R. B., & Reed., A. E. (31 de January de 2003). Before and after riparian management: sediment and nutrient exports from a small agricultural catchment. *270(Western Australia Original Research Article)*, 253-272.
- Meneses, I. C. (2003). *Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG*. PUC - MG. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado - PUC-MG.
- Milanovic, P. (2004). *Water Resources Engineering in Karst*. Boca Raton: CRC Press.
- MMA. (09 de 30 de 2009). *PORTARIA n° 358, DE 30 DE SETEMBRO 2009*. (Ministério do Meio Ambiente) Acesso em 10 de 09 de 2014, disponível em IMCBIO: [http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Portaria\\_358\\_2009-MMA\\_PNCPE.pdf](http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Portaria_358_2009-MMA_PNCPE.pdf)
- MME, M. d. (2009). *Análise das informações sobre recursos hídricos subterrâneos no país*. Recife: MME.
- Moura, A. C., FREITAS, C. R., DUTRA, L. V., COSTA, C., Guimarães, R., & CARVALHO, O. S. (2005). Aproveitamento do potencial de dados SRTM na geração de produtos de comunicação e na atualização de mapa de drenagem para o estado de Minas Gerais. *XVI Congresso Geológico Argentino. I*. La Plata: Actas del XVI Congreso Geológico Argentino.
- Mourão, M., Cruz, W., & Gonçalves, R. (2001). *Caracterização hidrogeológica da porção mineira da Bacia Hidrográfica do São Francisco*. Belo Horizonte: SBG-MG.
- NASA. (2014). *Landsat Mission*. (U.S. National Aeronautics and Space Administration) Acesso em 25 de 08 de 2014, disponível em [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/landsat/main/#.VFHn2vnF\\_El](http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/main/#.VFHn2vnF_El)
- NASA. (2014). *U.S. National Aeronautics and Space Administration*. (National Aeronautics and Space Administration) Acesso em 25 de 08 de 2014, disponível em [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/landsat/main/#.VFHn2vnF\\_El](http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/main/#.VFHn2vnF_El)
- NASA. (2015). *SRTM Mission*. Acesso em 25 de 02 de 2015, disponível em U.S. National Aeronautics and Space Administration: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.htm>
- Neves, W., & Pio, L. (2008). *O povo de Luzia: em busca dos primeiros americanos*. Rio de Janeiro: Editora Globo.
- Nobre-Lopes, J. (2002). *Diagenesis of the dolomites hosting Zn/Ag mineral deposits in the Bambuí Group at Januária region-MG* (Vol. Tese de doutoramento). Campinas: Unicamp, 183p.

- Nossa, T. C. (2011). *Avaliação da Vulnerabilidade do Aquífero Cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP*. Salvador: UFBA.
- NRC, N. R. (1993). *Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty*. Committee for Assessing Ground Water Vulnerability. Washington D.C.: National Academy Press.
- Paixão, M. S. (2005). Análise da acurácia das estimativas de posicionamento do nível freático e dos teores de umidade do solo com o emprego dos métodos de sísmica de refração rasa e georadar a partir de um estudo no campus da USP. São Paulo/SP: IGC-USP.
- Pereira, R. (2007). *Cráton do São Francisco, Kimberlitos e Diamantes*. UnB - Universidade de Brasília - Tese de doutorado, IG, Brasília.
- Pessoa, P. (1998). *Mapa da vulnerabilidade da APA Carta Lagoa Santa*. Belo Horizonte: CPRM/IBAMA.
- Pessoa, P. F. (1996). *Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas – MG: potencialidades e risco*. (Vols. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências). São Paulo.: Universidade de São Paulo.
- Pessoa, P. P. (2005). *Hidrogeologia dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa - MG*. Belo Horizonte: DESA - UFMG.
- Piló, L. (1998). *Morfologia cárstica e materiais constituintes: Dinâmica e evolução da Depressão Poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais*. São Paulo: Tese de Doutorado, Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.
- Polemio, M., Casarano, D., & Limoni, P. P. (2009). Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9.
- Queluz, J. T., Sims, L. P., & Sturaro, J. R. (2011). Geoestatística aplicada ao mapeamento da vulnerabilidade do aquífero guarani. In: *II SIMPOSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2011, Botucatu. ANAIS DO II SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS.*, pp. 01-05.
- Ravbar, N. (2007). *The protection of karst waters – a comprehensive Slovene Approach to vulnerability and contamination risk mapping*. Postojna, Ljubljana: ZRC Publishing, Karst Research Institute at ZRC SAZU 6: Carsologica.
- Ravbar, N., & Goldscheider, N. (2007). Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. *36(3):397-411*. Fonte: <http://carsologica.zrcsazu.si/downloads/363/5ravbar.pdf>

- Rebouças, A. C. (1999). *Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação*. São Paulo: Editora Escrituras.
- RIBEIRO, C. (1995). *O clima no Planalto de Lagoa Santa-MG. Em: Estudos ambientais e propostas de manejo, na região do carste, no Planalto de Lagoa Santa*. Belo Horizonte: Projeto FAPEMIG: CEX-1133/90. Relatório Final.
- Rizzi, N. (1981). Função da floresta na manutenção da qualidade da água para uso humano. 54-65.
- Rizzini, C. T. (1979). *Tratado de fitogeografia do Brasil*. São Paulo: EDUSP.
- Rodrigues, P. C. H. *Detecção semi automática de depressões altimétricas por Geoprocessamento a partir de Sensoriamento Remoto (dados SRTM) - Potencialidades para detecção de dolinas (cársticas ou não)*. Publicação interna CDTN - 910. - Belo Horizonte : CNEN/ CDTN, 2011.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. (NASA SP-351 I, 309-317).
- Silva, J. (2003). *Caracterização Hidrogeológica Ambiental da Área de Influência da Mina Lapa Vermelha na Região Cárstica de Lagoa Santa, MG*. DESA - UFMG, Belo Horizonte.
- Silva, R. d. (2001). *IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE RECARGA E DESCARGA DO AQUÍFERO CARSTE NA BACIA DO RIBEIRÃO DA ONÇA E SUA RELAÇÃO COM O MANANCIAL DE SUPERFÍCIE, NO MUNICÍPIO DE COLOMBO-PR*. Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba.
- Souza, F. S. (2007). *Uso de métodos geoestatísticos no auxílio à modelagem geológica*. Porto Alegre: UFRGS.
- Souza, H. (. (1998). *Zoneamento Ambiental da APA Carste de Lagoa Santa. In: APA Carste de Lagoa Santa*. Belo Horizonte: CPRM/IBAMA.
- Souza, J. F., & Vidal, F. W. (2005). Rochas Carbonáticas. Em C. d. CETEM, *Rochas e Minerais Industriais do Ceará* (pp. 49-66). Rio de Janeiro: CETEM.
- Suguió, K. (2003). *Geologia Sedimentar* (Vol. 1). São Paulo: Edgard Blucher.
- Sweeting, M. (1972). *Karst Landforms*. London: Mackmillan.
- Taltasse, P. (1972). Mapas da vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP).
- Teixeira, A. (1995). Qual a melhor definição de SIG. (11).
- Teixeira, A., & Christofoletti, A. (1997). *Sistema de Informação Geográfica: Dicionário Ilustrado*.
- Travassos, L. P. (2010). *Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil*. Belo Horizonte: Tradição Planalto.

- Tripet, J., Doerfliger, N., & Zwahlen, F. (1997). Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland. *Hydrogéologie*, 51-57.
- Tuller, M., Ribeiro, J., & Danderfer Filho, A. (1991). *Geologia da região cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG)*. Belo Horizonte: CPRM.
- Tundisi, J. G., & Tundisi, T. (2010). Impactos potenciais das alterações do Código Florestal nos recursos hídricos. *10. Biota Neotrop.* Fonte: <http://www.biotaneotropica.org.br/v10n4/en/abstract?article+bn01110042010>
- UFLA. (2014). Acesso em 17 de 06 de 2014, disponível em DCS Universidade Federal de Lavras: <http://www.dcs.ufla.br/Cerrados/Portugues/CArgissolo.htm>
- UFV. (2010). *Mapa de Solos do estado de Minas Gerais*. UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA - DEPARTAMENTO DE SOLOS-DPS / LABGEO, Belo Horizonte.
- USGS. (2014). *Earth Explorer*. Acesso em 2014 de 06 de 23, disponível em U.S. Geological Survey: <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- USGS. (2014). *US Geological Survey*. Acesso em 2014 de 06 de 23, disponível em Earth Explorer: <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Valeriano, M. M., Kuplich, T. M., Storino, M. Amaral, B. D., Mendes, J. N., & J., L. D. (oct de 2005). Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90 m data. *Computers and Geoscience*, 32, 1169-1181.
- Varella, C. A., & Junior, D. G. (2008). *Estudo do Interpolador IDW do Arcview para Utilização*. Acesso em 22 de 04 de 2015, disponível em [http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT190\\_principios\\_em\\_agricultura\\_de\\_precisao/Aulas/Estudo%20do%20interpolador%20idw%20arcview.htm](http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT190_principios_em_agricultura_de_precisao/Aulas/Estudo%20do%20interpolador%20idw%20arcview.htm)
- Veni, G., DuChene, H., Crawford, N., Groves, C., Huppert, G., Kastning, E., . . . Wheeler, B. (2001). *Living with karst - A fragile foundation series 4*. Alexandria, Virgínia: U.S. Geological Survey.
- Viana, H., Tavaves, V., & Kohler, H. (1998). *Geologia, Recursos Minerais e Geomorfologia*. In: *APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico*. Belo Horizonte. Volume I: CPRM/IBAMA.
- Vías, J. M., Andreo, B., Perles, M. J., Carrasco, F., & Jiménez, I. V. (2003). In: *COST action 620: Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*. European Approach. Director Zwahlen, F.
- Vías, J. M., Andreo, B., Perles, M. J., Carrasco, F., Vadillo, I., & Jiménez, P. (2002). Preliminary proposal of a method for contamination vulnerability mapping in carbonate. *Karst and Environment*, 75-83.

- Vías, J. M., Andreo, B., Perles, M. J., Carrasco, F., Vadillo, I., & Jiménez, P. (2006). Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers. *Hydrogeology Journal*, 912-925.
- Vieira, L. C. (2015). *Características da Geologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa, MG*. IGC. Belo Horizonte: UFMG.
- Von Stempvoort, D., Ewert, L., & Wassenaar, L. (1992). Aquifer Vulnerability Index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, vol 18, 25-37.
- Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability - IAH*. Vol 16. Hannover: Heise Publ. 131p.
- White, W. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. New York: Oxford University Press.
- White, W. B. (2003). *Conceptual models for karstic aquifers*. Charles Town: The Karst Waters Institute.
- Zaporozec, A. (1985). Groundwater pollution potential of Barron County, Wisconsin. Map 87-2i, scale 1:100.000. Wisconsin Geological and Natural History Survey.
- Zektser, I. S., & Everett., L. G. (2004). *Groundwater resources of the world and their use*. UNESCO.
- Zwahlen, F. (2003). *COST action 620: Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers*.



## **ANEXO I**

**Dados médios anuais das estações pluviométricas utilizadas**

## Vespasiano

<b>Ano</b>	<b>Precipitação total</b>	<b>Número de dias chuvosos</b>	<b>Ano</b>	<b>Precipitação total</b>	<b>Número de dias chuvosos</b>
1974	1103.4	72	1990	829.7	47
1975	1104.9	102	1991	1384.4	85
1976	1145.2	112	1992	1576.9	90
1977	1247.2	80	1993	1019.8	60
1978	1362.5	108	1994	1152.9	72
1979	2121.9	110	1995	1304.2	62
1980	1286	92	1996	1384.5	89
1981	1309.2	90	1997	1621.1	99
1982	1111.4	97	1998	1241.2	89
1983	1644.2	116	1999	1193.3	78
1984	930.1	61	2000	1215.5	95
1985	1611.6	109	2001	1403.1	69
1986	1073.9	76	2002	1381.6	97
1987	1119.4	87	2003	1242	87
1988	1372.3	66	2004	1430.9	116
1989	1340.3	79	2005	1514.9	116

## Pedro Leopoldo

Ano	Precipitação total	Número de dias chuvosos	Ano	Precipitação total	Número de dias chuvosos
1974	1129.4	64	1990	845.8	69
1975	1097.3	73	1991	1519.4	94
1976	1249.5	90	1992	1568.8	81
1977	1015.2	79	1993	1081.1	56
1978	1211.4	77	1994	1194.9	83
1979	2057.7	115	1995	1466.9	84
1980	1245.6	83	1996	1409.9	68
1981	1338.8	102	1997	1582.6	97
1982	1048	102	1998	1199.7	97
1983	1845.9	150	1999	1095.9	87
1984	1024.2	83	2000	1246.7	101
1985	1734	101	2001	1230.7	89
1986	1060.2	90	2002	1320.8	103
1987	1044.2	95	2003	1245.4	99
1988	1290.6	88	2004	1525.9	122
1989	1548.1	100	2005	1595.5	117

## Fazenda Vargem Bonita

<b>Ano</b>	<b>Precipitação total</b>	<b>Número de dias chuvosos</b>	<b>Ano</b>	<b>Precipitação total</b>	<b>Número de dias chuvosos</b>
1974	1098.7	76	1990	763.3	72
1975	1208.1	57	1991	1876.6	106
1976	1130.1	86	1992	1590.4	120
1977	1111.4	39	1993	894.3	91
1978	1287.2	89	1994	1415.9	90
1979	1897.9	83	1995	1634.7	98
1980	1289	66	1996	1372.5	92
1981	1478.5	101	1997	1597.8	100
1982	1177.5	79	1998	1055.9	94
1983	1965	134	1999	976.9	81
1984	954	89	2000	1265	92
1985	1418	108	2001	1097	78
1986	944.6	88	2002	1247.4	83
1987	1161.2	89	2003	939.5	78
1988	1154	92	2004	1137.3	88
1989	1256	94	2005	1321.8	102

## **APÊNDICE I**

### **Planilhas de Campo**

### Poços Profundos e Cisternas

Ponto	Lat	Long	Data da Visita	Z	NE	ND	Tipologia	Perfil	Existente	Situacao	Empresa perf.	Nome local
PN09	-19.6445	-43.8975	11-Jul-15	752	1.30		Poco		Sim	Lacrado		
CIS05	-19.4091	-44.0232	10-Jul-15	678	3.78		Cisterna		Sim			
CIS07	-19.5283	-44.0768	10-Jul-15	743	6.00		Cisterna		Sim			
C-08/ Lagoa dos Mares			7-Jul-15		11.02	28.6	Poco		Sim	Operando		
C-04/ Lagoa dos Mares	-19.6450	-43.9803	7-Jul-15		11.73	30.29	Poco		Sim	Operando		
CIS02	-19.5786	-44.0271	8-Jul-15	771	15.7		Cisterna		Sim			
CIS03	-19.5021	-44.1150	9-Jul-15	825	15.75		Cisterna		Sim			
CIS06	-19.4131	-44.0246	10-Jul-15	691	16.35		Cisterna		Sim	Não tem manilha		Bairro São Bento
C-03/ rua do contorno centro	-19.6328	-43.9917	7-Jul-15		21.86	34.44	Poco		Sim	Operando		
CIS08	-19.5530	-44.0863	10-Jul-15	831	22.35		Cisterna		Sim			
PN04	-19.6581	-43.9168	7-Jul-15	760	23.00	25.00	Poco		Sim	Operando		Condomínio Amendoeiras
CIS01	-19.5936	-43.8987	7-Jul-15	717	23.73		Cisterna		Sim			
PN05	-19.6582	-43.9161	7-Jul-15	761	25.00	27.00	Poco		Sim	Operando		Condomínio Amendoeiras
3100002266	-19.4001	-44.0333	7-Jul-15				Cisterna		Nao			
3100002343	-19.5601	-44.0844	7-Jul-15				Poco		Nao			Posto de Saúde
3100002347	-19.5584	-44.0861	7-Jul-15				Poco		Nao			
3100002348	-19.5579	-44.0867	7-Jul-15				Poco		Nao			
3100003024	-19.4026	-44.1283	21-Aug-15	751			Poco		Sim			
3100003036	-19.4017	-44.0777	20-Aug-15	725			Poco		Sim			
3100003038	-19.4133	-44.0250	10-Jul-15	690			Poco		Sim	Seco em 10m (colapso)		
3100003057	-19.6186	-43.9567	8-Jul-15	754			Poco		Sim	Jorrante		
3100003059	-19.6706	-43.9525	7-Jul-15				Poco	Sim	Nao			
3100003061	-19.6487	-43.9802	22-Aug-15	758			Poco		Sim			
3100003075	-19.6974	-43.8917	18-Aug-15	689			Poco		Sim			
3100003093	-19.5938	-43.8983	7-Jul-15	715			Poco		Sim	Seco		
3100003100	-19.6723	-43.8919	7-Jul-15				Poco		Nao	Cimentado		associação da policia civil Lagoa santa
3100003131	-19.5129	-44.0364	19-Aug-15	686			Poco		Sim			
3100003133	-19.4397	-43.9761	20-Aug-15	703			Poco		Sim			
3100003139	-19.5064	-44.0110	20-Aug-15	672			Poco		Sim			
3100003149	-19.5092	-44.1061	9-Jul-15	831			Poco		Sim	Operando		
3100003153	-19.5380	-44.0311	19-Aug-15	697			Poco		Sim			
3100003155	-19.5292	-44.0765	11-Jul-15	741			Poco		Sim	Cisterna Colapsada		
3100003168	-19.5560	-44.0886	7-Jul-15				Poco	Sim	Nao	Cimentado		
3100003176	-19.5855	-44.0015	8-Jul-15	783			Poco		Sim	Operando		
3100003179	-19.6537	-44.0074	7-Jul-15				Poco	Sim	Nao			Xavier Industrial

### Poços Profundos e Cisternas

3100003196	-19.5303	-43.9313	8-Jul-15			Poco	Sim	Bombeando		
3100003202	-19.5790	-44.0267	7-Jul-15			Poco	Nao			
3100003234	-19.4121	-44.0779	21-Aug-15	702		Poco	Sim			
3100003251	-19.5023	-44.1147	7-Jul-15			Cisterna	Nao			
3100003461	-19.7011	-43.9032	11-Jul-15	687		Poco	Sim	Lacrado		
3100003463	-19.6878	-43.9927	8-Jul-15	703		Poco	Sim	Operando		
3100018183	-19.5396	-44.0277	19-Aug-15	683		Poco	Sim			
3100018184	-19.5630	-44.0597	20-Aug-15	770		Poco	Sim			
3100018189	-19.5408	-44.0275	19-Aug-15	686		Poco	Sim			
3100020598	-19.5889	-43.9125	7-Jul-15			Poco	Sim	Operando		
3100020599	-19.5966	-43.9111	11-Jul-15	711		Poco	Sim	Lacrado		
103 (VIDA)						Cisterna	Nao			
PN014	Ver obs	Ver obs	8-Jul-15	795		Poco	Sim	Poço seco		
C-01DEMAG	-19.6986	-43.9063	7-Jul-15	689		Poco	Sim	Operando		
C-01MATOZINHOS	-19.5567	-44.0880	9-Jul-15	763		Poco	Sim	Operando		
C08PORTEIRA	-19.6690	-43.9519	8-Jul-15	690		Poco	Sim	Operando		
C-13MATOZINHOS	-19.5549	-44.0907	9-Jul-15	770		Poco	Sim			
CIS001	-19.6976	-43.8923	18-Aug-15	691		Cisterna	Sim			
CIS002	-19.6981	-43.8917	18-Aug-15	689		Cisterna	Sim			
CIS003	-19.6971	-43.8913	18-Aug-15	685		Cisterna	Sim			
CIS004	-19.6116	-43.9042	18-Aug-15	726		Cisterna	Sim			
CIS005	-19.6116	-43.9051	18-Aug-15	726		Cisterna	Sim			
CIS006	-19.5847	-43.9140	18-Aug-15	703		Cisterna	Sim			
CIS007	-19.5997	-43.9358	18-Aug-15	726		Cisterna	Sim			
CIS008	-19.5392	-44.0319	19-Aug-15	704		Cisterna	Sim			
CIS009	-19.5722	-44.0808	20-Aug-15	762		Cisterna	Sim			
CIS010	-19.6475	-43.9812	22-Aug-15	746		Cisterna	Sim			
E02	-19.5626	-44.0587	10-Jul-15	782		Poco	Sim			Bairro São Paulo
PN001	-19.5830	-43.9322	18-Aug-15	696		Poco	Sim			
PN002	-19.5859	-43.9304	18-Aug-15	702		Poco	Sim			
PN003	-19.6005	-43.9354	18-Aug-15	723		Poco	Sim			
PN004	-19.5784	-44.0526	19-Aug-15	851		Poco	Sim			
PN005	-19.5395	-44.0324	19-Aug-15	709		Poco	Sim			
PN006	-19.5693	-44.0719	20-Aug-15	791		Poco	Sim			

### Pocos Profundos e Cisternas

PN007	-19.5251	-44.0270	20-Aug-15	675		Poco	Sim			
PN008	-19.4834	-44.0170	20-Aug-15	676		Poco	Sim			
PN009	-19.4476	-44.0089	20-Aug-15	651		Poco	Sim			
PN01	-19.6773	-43.8877	7-Jul-15	777		Poco	Sim	Seco (regua de 50m)		
PN010	-19.4041	-44.1238	21-Aug-15	766		Poco	Sim			
PN011	-19.3953	-44.0810	21-Aug-15	727		Poco	Sim			
PN012	-19.4293	-44.0932	21-Aug-15	738		Poco	Sim			
PN013	-19.6783	-43.9611	22-Aug-15	698		Poco	Sim			
PN02	-19.6726	-43.8907	7-Jul-15	804		Poco	Sim	Seco (regua de 50m)		
PN03	-19.6718	-43.8909	7-Jul-15	803		Poco	Sim	Operando	GEOBRAS	associação da policia civil Lagoa santa
PN06	-19.5627	-44.0586	9-Jul-15	781		Poco	Sim			
PN07	-19.4122	-44.0246	10-Jul-15	679		Poco	Sim	Operando		Bairro São Bento
PN08	-19.5218	-44.0783	10-Jul-15	752		Poco	Sim	Operando		Fazenda bom jardim
Poco 74 (VIDA)			7-Jul-15			Cisterna	Nao			
VIDA138	-19.5729	-44.0284	19-Aug-15	743		Poco	Sim			



## Vegetação

Ponto	Lat	Long	UTM Y	UTM X	Fuso	Data da Visita	Z	Vegetação	Obs2
VEG01-1	-19.6999	-43.8998	7821358.18	615308.42	23S	7-Jul-15	682.6	Sim	
VEG02-1	-19.5796	-43.9918	7834722.31	605739.86	23S	8-Jul-15	705.8	Sim	Fundo de dolina com afloramento de calcarenito
VEG03	-19.6102	-43.9750	7831331.96	607489.13	23S	8-Jul-15	834.1	Oeste: Não/ Leste: esparsa	
VEG04	-19.6079	-43.9668	7831579.55	608349.78	23S	8-Jul-15	769.0	Sim	
VEG05	-19.5562	-43.9345	7837277.96	611766.40	23S	9-Jul-15	706.9	Oeste: Sim/ Leste: esparsa	
VEG06	-19.4253	-44.1278	7851879.92	591568.82	23S	9-Jul-15	780.1	Esparsa	
VEG07	-19.3992	-44.0314	7854717.11	601701.29	23S	10-Jul-15	721.7	Esparsa	
VEG08	-19.4309	-44.0462	7851211.04	600130.35	23S	10-Jul-15	713.0	Esparsa/ Nao	
VEG09	-19.5301	-44.0742	7840255.44	597130.43	23S	11-Jul-15	739.7	Sim	
VEG10	-19.6979	-43.8908	7821573.85	616251.55	23S	18-Aug-15	685.9	Não	
VEG11	-19.6995	-43.9143	7821407.80	613789.88	23S	18-Aug-15	687.9	Não	
VEG12	-19.6117	-43.9041	7831117.59	614917.14	23S	18-Aug-15	732.8	Sim	
VEG13	-19.5778	-43.9323	7834890.81	611983.36	23S	18-Aug-15	715.3	Esparsa	
VEG14	-19.5790	-43.9274	7834747.58	612500.04	23S	18-Aug-15	701.0	Esparsa	
VEG15	-19.5780	-43.9320	7834862.67	612022.52	23S	18-Aug-15	718.1	Esparsa	
VEG16	-19.5363	-44.0312	7839547.92	601635.96	23S	19-Aug-15	721.3	Não	
VEG17	-19.5722	-44.0809	7835598.10	596401.79	23S	20-Aug-15	749.1	Sim	Riacho próximo
VEG18	-19.5518	-44.0455	7837833.47	600129.37	23S	20-Aug-15	829.1	Esparsa	
VEG19	-19.5309	-44.0321	7840144.50	601545.85	23S	20-Aug-15	700.1	Sim	Plantio
VEG20	-19.5096	-44.0155	7842490.12	603301.00	23S	20-Aug-15	676.5	Sim	
VEG21	-19.4859	-44.0165	7845114.98	603208.05	23S	20-Aug-15	685.4	Sim	Pivo
VEG211	-19.4651	-44.0028	7847408.29	604666.51	23S	20-Aug-15	688.3	Sim	
VEG22	-19.4474	-44.0085	7849367.99	604080.53	23S	20-Aug-15	660.7	Sim	
VEG23	-19.4285	-43.9906	7851447.13	605968.42	23S	20-Aug-15	669.7	Sim	

### Vegetação

VEG24	-19.4233	-44.1248	7852095.58	591879.85	23S	21-Aug-15	772.0	Esparsa	
VEG25	-19.4138	-44.1360	7853156.20	590716.38	23S	21-Aug-15	778.5	Sim	
VEG251	-19.4039	-44.1178	7854242.09	592632.51	23S	21-Aug-15	797.0	Sim	
VEG26	-19.4121	-44.0778	7853315.78	596825.82	23S	21-Aug-15	708.6	Sim	Afloramento próximo
GGVEG	-19.5109	-44.0321	7821358.18	615308.42	23S	19-Aug-15	683.5	Sim	
GGVEG1	-19.5110	-44.0330	7834722.31	605739.86	23S	19-Aug-15	681.4	Não	
3100003176	-19.5855	-44.0015			23S	8-Jul-15	783	Não	Próximo ao posto de saúde
PN01	-19.6773	-43.8877			23S	7-Jul-15	777	Sim	Lagoa com paredão.
DOL05	-19.4433	-44.0673	7849860.56	597908.37	23S	10-Jul-15	717	Sim	
DOL13	-19.5386	-44.0283	7839287.77	601943.49	23S	19-Aug-15	683	Não	
DOL15	-19.5249	-44.0275	7840801.89	602033.71	23S	20-Aug-15	682	Não	
DOL16	-19.4744	-44.0088	7846380.76	604026.67	23S	20-Aug-15	705	Esparsa	Afloramento próximo
DOL17	-19.4677	-44.0047	7847116.83	604466.22	23S	20-Aug-15	681	Não	
UV1	-19.4384	-43.9798	7850344.53	607093.93	23S	20-Aug-15	678	Não	

### Dolinas

Ponto	Lat	Long	UTM y	UTM x	Data da Visita	Z	Observacao
DOL001	-19.7004	-43.9012	7821299.71	615160.14	18-Aug-15	676	
DOL002	-19.5106	-44.0403	7842395.52	600699.10	19-Aug-15	684	
DOL01	-19.5816	-44.0066	7834515.89	604192.70	8-Jul-15	802	
DOL02	-19.5478	-44.0338	7838270.67	601361.94	9-Jul-15	737	Dolina mapeada por IBAMA, 1998 com desvio do polígono p/ leste
DOL03	-19.4307	-44.0320	7851230.74	601618.60	10-Jul-15	672	Apresenta paredão e surgencia
DOL04	-19.4409	-44.0566	7850111.71	599036.52	10-Jul-15	719	Dolinas em sequencia a oeste do ponto
DOL05	-19.4433	-44.0673	7849860.56	597908.37	10-Jul-15	717	
DOL07	-19.7000	-43.9037	7821343.90	614898.48		682	
DOL08	-19.7004	-43.9012	7821299.95	615157.11		683	
DOL09	-19.5735	-44.0283	7835428.70	601920.64		750	Com água
DOL10	-19.5730	-44.0275	7835483.43	602007.90		748	
DOL11	-19.5732	-44.0287	7835454.51	601877.46		749	Com água
DOL12	-19.5732	-44.0271	7835460.31	602045.33		750	
DOL13	-19.5386	-44.0283	7839287.77	601943.49	19-Aug-15	683	
DOL14	-19.5374	-44.0321	7839422.70	601546.60		716	
DOL15	-19.5249	-44.0275	7840801.89	602033.71	20-Aug-15	682	
DOL16	-19.4744	-44.0088	7846380.76	604026.67	20-Aug-15	705	Afloramento próximo
DOL17	-19.4677	-44.0047	7847116.83	604466.22	20-Aug-15	681	
DOL18	-19.4036	-44.1352	7854284.37	590796.59	21-Aug-15	733	Com água
GGDOL	-19.5135	-44.0353	7842066.64	601226.46	19-Aug-15	675	
UV1	-19.4384	-43.9798	7850344.53	607093.93	20-Aug-15	678	
PN01	-19.6773	-43.8877			7-Jul-15	777	Lagoa com paredão
VEG02-1	-19.5796	-43.9918	7834722.31	605739.86		706	Fundo de dolina com afloramento de calcarenito

## **APÊNDICE II**

**Mapa da vulnerabilidade intrínseca da APA Carste de Lagoa Santa em escala  
1:50.000 pelo método COP**