

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia

Rogério Tadeu de Souza

Vulnerabilidade de Aquíferos Cársticos com Cobertura Espessa de Solo: Metodologia COP-Solo em Ambiente Tropical Úmido

Nº 48

BELO HORIZONTE
DATA (06/07/2020)

Rogério Tadeu de Souza

Vulnerabilidade de Aquíferos Cársticos com Cobertura Espessa de Solo: Metodologia COP-Solo em Ambiente Tropical Úmido

Versão Final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Doutor em Geologia.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada

Orientação: Prof. Dr. Augusto Sarreiro Auler

Belo Horizonte
2020

S729v Souza, Rogério Tadeu de.
2020 Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo [manuscrito] : metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido. – 2020.
231 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Augusto Sarreiro Auler.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 177-189.

Inclui anexos.

1. Hidrogeologia – Teses. 2. Aquíferos – Teses. 3. Proteção ambiental – Minas Gerais – Teses. 4. Carste – Lagoa Santa (MG) – Teses. I. Auler, Augusto Sarreiro. 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

**Vulnerabilidade de Aquíferos Cársticos com Cobertura Espessa de Solo:
Metodologia COP-Solo em Ambiente Tropical Úmido**

ROGÉRIO TADEU DE SOUZA

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

Aprovada em 06 de julho de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Augusto Sarreiro Auler (Orientador)
Instituto do Carste

Prof. Rodrigo Sérgio de Paula
UFMG

Prof. Olga Susana Heredia
Facultad de Agronomia, UBA

Prof. Marcelo Rodrigues de Sousa
Converge Engenharia Ltda.

Prof. Manuela Corrêa Pereira
Instituto Federal do Espírito Santo

Belo Horizonte, 6 de julho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o Prof. Dr. Augusto Sarreiro Auler pela acolhida em um momento difícil dessa caminhada final e pelas inúmeras discussões sobre o carste e suas nuances.

A minha tutora na Universidad de Buenos Aires, Prof. Dra. Olga Susana Heredia, pela força e apoio no desenvolvimento de parte da pesquisa, que resultou na construção do Índice de Atenuação Natural, que se mostrou de extrema importância na principal modificação do método.

O Prof. Dr. Bartolomé Andreo Navarro (Department of Geology and Center of Hydrogeology of the University of Málaga - CEHIUMA/UMA) e a Dra. Ana Isabel Marín (European Topic Center, University of Málaga - ETC/UMA) pela acolhida e ensinamentos aprofundados sobre o método COP e as correções necessárias para sua perfeita aplicação em país tropical.

O Prof. Dr. Jarbas Dias pelo apoio e discussões sobre as ferramentas, interpretações e saídas dos dados que geraram o mapa de vulnerabilidade por meio do software ArcGis, em conjunto com o grupo da Universidad de Málaga.

O Prof. Dr. Fábio Oliveira, pelos primeiros passos em uma área totalmente nova para mim, solos, e pelas infindáveis discussões sobre o tema e o início de uma longa jornada de aprendizados aprofundados sobre o mesmo.

À Dra Manuela Côrrea Pereira, pelas discussões, trocas de idéias e olhares geopolíticos sobre a APA Carste de Lagoa Santa.

Ao CECAV/Icmbio (Proj. de Adequação e Implantação de uma Rede de Monit. de Águas Subt. em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, MG), ao CNPq pelo apoio sem os quais seria complexa a realização desse estudo e a Pró-reitoria de Pós-Graduação (PRPg) UFMG.

Gostaria de agradecer a todos aqueles que direta ou indiretamente estiveram envolvidos em algum momento no desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

As áreas cársticas desempenham um importante papel no abastecimento de água potável em nível mundial. Vários países europeus são exclusivamente abastecidos pela água oriunda de aquíferos cársticos. Com isso, há uma constante preocupação em proteger a qualidade dessas águas. Vários métodos de vulnerabilidade à contaminação já foram propostos para proteção de aquíferos, mas poucos são realmente aplicáveis ao carste. O método COP, acrônimo utilizado para designar os parâmetros C=concentração de fluxo, O=camadas sobrepostas e P=precipitação, foi desenvolvido para proteção de aquíferos cársticos de países europeus de clima mediterrâneo e apresentou bons resultados. Porém, sua aplicação direta no carste de clima tropical úmido precisa ser modificada, principalmente porque há extrema diferença na camada que protege o aquífero (Fator O). Dessa maneira, essa tese buscou a modificação do método original por meio da aplicação das características do solo da zona vadosa com a criação do método COP-Solo em parte de uma das áreas cársticas mais estudadas do Brasil, a APA (Área de Proteção Ambiental) Carste de Lagoa Santa. A aplicação do método COP requer um nível de informações quali-quantitativas elevado. O objeto de estudo original abrangia uma área total de 504 km². Como não foi possível, por escassez de dados, o desenvolvimento da pesquisa em toda extensão, a mesma sofreu uma redução para 240 km². Com isso, manteve-se um nível de confiabilidade dos resultados bastante satisfatório. Para a adaptação do Fator O e criação do método COP-Solo, foi criado um índice de atenuação natural levando em conta as características intrínsecas da camada de solo que protege o aquífero cárstico tropical (espessura, mineralogia, CTC, condutividade hidráulica, CO, pH e porcentagem de argila) que é completamente diferente da camada de solo que protege o aquífero cárstico europeu. Os resultados apresentados constataram que a modificação é realmente necessária. O método COP-Solo aplicado à área de estudo (240 km²) apresentou resultados de vulnerabilidade mais refinados e diferentes. Como era esperado, as classes muito baixa (64,88%) e baixa (28,55%) foram predominantes na metodologia original devido à maioria das espessuras de solo serem superiores a um metro. Já a metodologia COP-Solo se mostrou preponderantemente moderada (44,29%), seguida da classe baixa (38,19%). As classes muito alta (5,93%) e alta (11,30%) foram detectadas com maior expressividade pela metodologia COP-Solo. Os resultados indicam que a metodologia original necessita ser modificada para aplicação em carste tropical úmido com expressiva cobertura de solo.

Palavras chaves: proteção, aquífero cárstico, vulnerabilidade, modificação.

ABSTRACT

Karstic areas play an important role in providing drinking water worldwide. Several European countries are exclusively supplied with water from karst aquifers. Therefore, there is a constant concern to protect the quality of these waters. Diverse methods of contamination vulnerability have been proposed for aquifer protection, but few are applicable to karst. The COP method, acronym used to designate the parameters C=Concentration flow, O=Overlaying layers, and P=Precipitation, was developed for the protection of karst aquifers in Mediterranean European countries and showed decent results. However, its direct application in the tropical karst must be modified, mainly because there is extreme difference in the layer that protects the aquifer (O Factor). Thus, this thesis sought to modify the original method by applying the characteristics of the soil in the vadose zone with the creation of the COP-Soil method in part of the one of the most studied karstic areas of Brazil, the EPA Carste Lagoa Santa (Environmental Protection Area Lagoa Santa Karst). The application of the COP method requires high level of qualitative and quantitative information. The original project area covered a total area of 504 km². Due to scarcity of data, the research area has been reduced to 240 km², to maintain a satisfactory level of reliability. In order to adapt the O Factor and creation of the COP-Soil method, a natural attenuation index has been created taking into account the intrinsic characteristics of the soil layer that protects the tropical karstic aquifer (thickness, mineralogy, CEC, hydraulic conductivity, OC, pH and percentage of clay) which is completely different from the soil layer that protects the European karst aquifer. The results presented found modifications to be necessary. The COP-Soil method applied to the study area (240 km²) showed more refined and different vulnerability results. As expected, the very low (64,88%) and low (28,55%) were predominant in the original methodology due to soil thicknesses being greater than one meter. In the modified methodology the dominant classes were moderate (44,29%), followed by the lower class (38,19%). The very high (5,93%) and high (11,30%) classes were detected with made more evident by the COP-Soil methodology. The results indicate that the original methodology needs to be modified for application in humid tropical karst with significant soil cover.

Key words: protection, karst aquifer, vulnerability, modification.

RESUMEN

Las áreas kársticas juegan un papel importante en el abastecimiento de agua potable en todo el mundo. Varios países europeos reciben exclusivamente agua de los acuíferos kársticos. Por lo tanto, existe una preocupación constante por proteger la calidad de estas aguas. Se han propuesto varios métodos de vulnerabilidad a la contaminación para la protección de acuíferos, aunque son pocos los que realmente se pueden aplicar al karst. El método COP, acrónimo utilizado para designar los parámetros C=concentración de flujo, O=capas superpuestas y P=precipitación, se desarrolló para proteger los acuíferos kársticos de los países mediterráneos y presentó buenos resultados. Sin embargo, su aplicación directa en el karst de clima tropical necesita ser modificada, principalmente porque hay una diferencia extrema en la capa que protege el acuífero (Factor O). De esa manera, esa tesis ha buscado modificar el método original aplicando las características del suelo en la zona vadosa con la creación del método COP-Suelo, en una parte de las áreas kársticas más estudiadas de Brasil. El área original objeto de estudio cubría una superficie total de 504 km² (área original). Es de destacar que la aplicación del método COP requiere un nivel alto de información cuali-cuantitativas. Sin embargo, esto no ha sido posible debido a la escasez de datos. Por ello, el desarrollo de la investigación se redujo a un área de 240 km², manteniendo así un nivel muy satisfactorio de fiabilidad de los resultados. Para adaptación del Factor O y la creación del método COP-Suelo, se creó un índice de atenuación natural teniendo en cuenta las características intrínsecas de la capa de suelo que protege el acuífero kárstico tropical (espesor, mineralogía, CIC, conductividad hidráulica, CO, pH y % de arcilla) que es completamente diferente de la capa de suelo que protege el acuífero kárstico europeo. Los resultados presentados constataron que realmente la modificación era necesaria. El método modificado aplicado al karst del área de estudio (240 km²) presentó resultados de vulnerabilidad más refinados y distintos. Como se esperaba, las clases muy baja (64,88%) y baja (28,55%) fueron predominantes en la metodología original debido a que la mayoría de los espesores eran mayores a un metro. En la metodología COP-Suelo las clases muy alta (5,93%) y alta (11,30%) los valores obtenidos fueron más altos que en la metodología original. Los resultados indican que la metodología original necesita ser modificada para su aplicación en el karst tropical húmedo con una importante cobertura del suelo.

Palabras claves: protección, acuífero kárstico, vulnerabilidad, modificación, COP.

GLOSSÁRIO

Carste: é o termo usado para descrever um certo tipo especial de paisagem contendo cavernas e um grande sistema de água subterrânea desenvolvido especialmente em rochas solúveis.

Carste encoberto: ou *buried carst* ou paleocarste são carstes cobertos por rochas não solúveis ou material inconsolidado.

Carstificação: principal processo de desenvolvimento das paisagens cársticas e dos sistemas de drenagem cársticos formados em decorrência da dissolução pela água.

Conduto: grandes passagens formadas por dissolução no sistema cárstico onde a água subterrânea do carste flui, geralmente, com grande velocidade.

Contaminação: perda da qualidade da água subterrânea e/ou solo por atividades humanas.

Contaminante: qualquer substância que possa causar contaminação.

COST 620: *European Cooperation in Science & Technology (Vulnerability and risk mapping for the protection of karst aquifers)*.

Dolina: depressões fechadas ou elípticas que se formam no exocarste em função da dissolução de rochas solúveis, normalmente em subsuperfície.

Endocarste: ou carste subterrâneo é a zona do carste onde se desenvolve uma trama de pequenas fissuras, cavernas ou condutos fundamentais na dinâmica da água.

Epicarste: ou zona subcutânea constituída pela porção superior da rocha subjacente coberta pelo solo, contendo uma rede de fissuras alargadas por processos cársticos. Aqui se dá a interface solo e rocha.

Exocarste: conjunto morfológico superficial do carste.

Fluxo concentrado: processo observado em redes de condutos cársticos.

Fluxo difuso: processo que ocorre na matriz rochosa de baixa permeabilidade ou nas camadas calcárias levemente fraturadas.

Infiltração difusa: é aquele que se dá através do solo ou rochas permeáveis.

Infiltração concentrada ou direta: é aquela que ocorre através de dolina ou sumidouros. Também pode acontecer através das discontinuidades estruturais apresentadas nos afloramentos rochosos.

Recarga concentrada (autogênica e alogênica): recarga realizada por depressões fechadas (dolinas) e sumidouros.

Recarga difusa (autogênica e alogênica): recarga realizada na zona subcutânea (epicarste) e solo por meio de precipitação ou degelo bem como na superfície das rochas (sem presença de descontinuidades).

Rochas não cársticas: são rochas, que pela sua composição química, não são afetadas significativamente pelo processo de dissolução durante o intemperismo.

Sistema cárstico: interconectividade das áreas cársticas, na qual se forma uma unidade hidrogeológica.

Sorção: mecanismo de retenção de íons e moléculas pela fase sólida (ex.: adsorção, precipitação de superfície e polimerização).

Sumidouro: ponto onde há entrada direta de água, seja superficialmente por escoamento ou por um córrego ou rio, que recarrega a zona saturada.

Top soil: camada superficial do solo onde a atividade biológica é mais pronunciada.

Subsolo: camada logo abaixo do *top soil*.

Vulnerabilidade: facilidade com que um contaminante aplicado na superfície de um terreno pode alcançar as águas subterrâneas em função de atividades antrópicas e é função das condições do meio e das propriedades do contaminante.

Zona saturada: região abaixo do nível freático na qual os poros estão saturados de água.

Zona vadosa: ou zona não saturada é a região compreendida entre a superfície do terreno e a superfície da zona saturada; algumas definições incluem a franja capilar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo.....	21
Figura 2.1 - Localização dos pontos executados (área original e área reduzida) de acordo com o tipo de solo.....	27
Figura 2.2 - Figura esquemática de amostra composta para cada ponto.....	27
Figura 2.3 - Classificação textural das amostras de solo com os pontos escolhidos para os ensaios de infiltração.....	35
Figura 2.4 - Figura esquemática do Permeâmetro de Guelph após instalado e pronto pra execução do ensaio.....	36
Figura 2.5 - Fator de Forma C.....	39
Figura 2.6 - Mapa redefinido da área de estudo a partir de dados de poços tubulares... 42	42
Figura 2.7 - Mapa da distância dos poços até os pontos de coleta de amostras de solo. 44	44
Figura 3.1 - Análise do tamanho de partículas de Terra Rossa.....	52
Figura 3.2 - Partes que compõem um solo.....	57
Figura 3.3 - Relação matéria orgânica com a profundidade de solo.....	58
Figura 3.4 - Intervalos de valores para condutividade hidráulica e permeabilidade em meio saturado.....	68
Figura 3.5 - Modelo conceitual instituído pela COST Action 620 para proteção da água subterrânea.....	74
Figura 4.1 - Localização dos perfis de solo realizados por Shinzato (1998).....	80
Figura 4.2 - Distribuição de cotas altimétricas na área de estudo com feições geomorfológicas.....	84
Figura 4.3 - Modelo conceitual com as características cársticas e geomorfológicas que estão diretamente associadas à vulnerabilidade intrínseca à contaminação e sua interação com água superficial e subterrânea no modelado cárstico.....	90
Figura 4.4 - Pontos observados de recarga alogênica concentrada na área de estudo....	91
Figura 4.5 - Modelo conceitual do meio fraturado parcialmente saturado, mostrando as linhas de fluxo circundando as porções secas das fraturas.....	93
Figura 4.6 - Rotas confirmadas nos ensaios positivos com traçadores corentes.....	98
Figura 4.7 - Hidrografia da área de estudo.....	102
Figura 5.1 - Comparação do que é observado entre a zona vadosa do carste europeu e tropical para o método COP.....	105

Figura 6.1 - Síntese dos processos que atenuam potenciais contaminantes nos solos tropicais e formas de infiltração em áreas cársticas.	108
Figura 6.2 - Diferentes situações de zona vadosa encontradas na área estudada.	113
Figura 6.3 - Análise estatística de similaridade das variáveis utilizadas para composição do IAN.	117
Figura 6.4 - Análise do comportamento dos diferentes tipos de solos em relação aos parâmetros analisados para o IAN.	120
Figura 8.1 - Diagrama Triangular para definição de classe textural do solo da área de estudo.	127
Figura 8.2 - Diferenças de K em relação à profundidade da zona saturada com o tipo de solo.	135
Figura 8.3 - Localização dos poços em relação aos pontos de amostragem de solo.	136
Figura 8.4 - Mapa espessura da zona vadosa.	138
Figura 8.5 - Mapa espessura de solo.	141
Figura 8.6 - Mapa de espessura de solo gerado para área original.	143
Figura 8.7 - Comparação entre os mapas gerados para as duas áreas.	144
Figura 8.8 - Mapa de afloramento rochoso na área estudada.	146
Figura 8.9 - Resultado do O Map para o método original.	148
Figura 8.10 - Resultado O Map para o método COP-Solo.	149
Figura 8.11 - Resultados das simulações de O Score original para diferentes profundidades.	151
Figura 8.12 - Mapa de declividade.	153
Figura 8.13 - Mapa de vegetação.	154
Figura 8.14 - SV mapa para o cenário 1.	155
Figura 8.15 - SV mapa para o cenário 2.	156
Figura 8.16 - Mapa de C_{SCORE}	158
Figura 8.17 - Localização das estações utilizadas para o cálculo do Fator P.	160
Figura 8.18 - Gráficos mostrando a média histórica anual das 4 estações consideradas.	161
Figura 8.19 - Gráficos mostrando dias de chuva para série histórica.	163
Figura 8.20 - Mapa de P_{SCORE}	165
Figura 9.1 - Mapa de vulnerabilidade para o método original.	168
Figura 9.2 - Mapa de vulnerabilidade para o método COP-Solo.	169
Figura 9.3 - Análise comparativa entre os métodos.	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Distribuição de quantidade de amostras, na área original por % de área coberta.	25
Tabela 2.2 - Tempo necessário, a diferentes temperaturas, para sedimentação de partículas de solo com peso específico de 2,65. Para a argila considerou-se partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm.	33
Tabela 2.3 - Valores de α para diferentes tipos de solo.	38
Tabela 2.4 - Quantidade de poços utilizados como pontos na elaboração dos mapas de solo e Zona Vadosa.	40
Tabela 3.1 - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7 e sua dependência com o pH	61
Tabela 3.2 - Classes de vulnerabilidade do método COP.	78
Tabela 6.1 - Valores fundamentais para normalização e pesos para as variáveis do IAN.	109
Tabela 6.2 - Simulação para escolha do método mais apropriado para definição da espessura da zona vadosa.	112
Tabela 6.3 - Valores dos parâmetros analisados na área de estudo para construção do IAN.	114
Tabela 6.4 - Valores normalizados dos parâmetros analisados na área de estudo para construção do IAN.	115
Tabela 6.5 - Valores do IAN calculados.	116
Tabela 6.6 – Resultados estatísticos das análises de solo, Dendograma.	116
Tabela 6.7 – Análise de Componente Principal para pH, CO, CTC, Argila, Silte, Condutividade Hidráulica e Relação Caulinita-Óxidos.	116
Tabela 7.1 - Equivalência de valores dados ao IAN comparados com os valores Os. .	121
Tabela 7.2 - Equivalência de valores dados ao score do fator O original e COP-Solo. .	122
Tabela 7.3 - Comparação entre os resultados dos métodos COP Original e Modificado para o cenário de maior vulnerabilidade da camada protetora do aquífero.	122
Tabela 7.4 - Comparação de resultados do método COP em diferentes países europeus.	124
Tabela 8.1 - Relação silte/argila nas amostras coletadas na área de estudo.	128
Tabela 8.2 - Resultados das amostras de solos analisadas.	129
Tabela 8.3 - Variabilidade da condutividade hidráulica em relação ao tipo de solo nos diferentes pontos ensaiados.	134

Tabela 8.4 - Comparação dos valores O_{SCORE} do método original e modificado.....	139
Tabela 8.5 - Espessura de calcário, onde há afloramento, na zona vadosa.	147
Tabela 8.6 – Resultados de P_Q , P_I e P_{SCORE}	164

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 8.2 - Gráfico dos resultados das amostras de solo submetidas à Difração de Raios X (DRX).	131
Gráfico 8.3 - Comparação textural versus condutividade hidráulica.	132
Gráfico 8.4 - Comparação da relação caulinita-óxidos com as demais texturas.	132
Gráfico 8.5 - Relação caulinita/óxidos versus condutividade hidráulica.	133
Gráfico 8.6 - pH versus condutividade hidráulica nos pontos de ensaio com Permeâmetro de Guelph na área estudada.	134

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Fluxograma para o cálculo do método COP.	76
Quadro 4.1 - Resumo da geologia regional. Base: Mapeamento CPRM, Tuller e Ribeiro, 1992, com modificações.	88

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1 - Trado de “calha” sendo cravado antes da coleta das amostras (A), mostrando medidas de inserção e possíveis mudança de horizonte (B), antes da coleta das alíquotas pra envio ao laboratório.....	28
Foto 2.2 - Cor tomada em campo com a Carta de Cores Munsell.....	30
Foto 2.3 - Ensaio realizado no Ponto 52.....	37
Foto 3.1 - Solo Terra Rossa.....	50
Foto 4.1 – Infiltração no exocarste via fraturas(1) e descontinuidades em afloramento (2). Nesta foto, observa-se que parte da água de infiltração que encontra uma “saída” no meio do maciço calcáreo, evidenciando o importante papel do epicarste na recarga do aquífero.....	95
Foto 4.2 – Injeção de rodamina em sumidouro.....	97
Foto 4.3 – Surgência Fazenda Topázio.....	100
Foto 7.1 - Sierra de Mijas, situada a oeste de Málaga. Área de recarga de Torremolinos.....	125
Foto 7.2 - Surgências de Torremolinos.....	125
Foto 7.3 - Sierra de Líbar, Sul da Espanha.....	126
Foto 7.4 - Cueva del Gato, Sul da Espanha. Mostrando a não existência de solo.....	126
Foto 8.1: Características das geoformas, vegetação e declividades que influenciam a construção da metodologia original.....	157
Foto 8.2: Características das geoformas, vegetação e declividades que influenciam na aplicação da metodologia original no carste tropical. (Fotos do autor).....	157

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Localização da área de estudo	21
1.2 Hipótese	21
1.3 Justificativa.....	22
1.4 Objetivos.....	23
2. MÉTODOS	24
2.1 Métodos para coleta e análise laboratorial das amostras de solos	24
2.2 Método para ensaio de infiltração	34
2.3. Método para elaboração dos mapas da zona vadosa e de solos.....	39
2.4. Método para elaboração do mapa P.....	45
2.5. Método para elaboração do mapa C	45
2.5.1. Mapas sv	45
2.5.2. Mapa C.....	46
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	47
3.1. Solo	47
3.1.1. Solos Mediterrâneos e Europeus vs. Solos Tropicais em Áreas Cársticas....	49
3.1.2. Classes Representativas dos Solos Tropicais Brasileiros	53
3.1.3. Carbono Orgânico – CO/foc.....	56
3.1.4. pH.....	59
3.1.5. Capacidade de Troca Catiônica – CTC	60
3.1.6. Óxidos	61
3.2. Processos de interação contaminante-solo	63
3.2.1. Sorção/Desorção	63
3.2.2. Substâncias hidrofóbicas e hidrofílicas.....	64
3.2.3. Dissolução/precipitação	64
3.3. Potenciais contaminantes no solo.....	65
3.4. Infiltração.....	67
3.5. Métodos de vulnerabilidade	70
3.5.1. O método COP	73
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	78
4.1. Clima	78
4.2. Solo	79
4.3. Geomorfologia.....	81
4.4. Geologia.....	86

4.5. Hidrogeologia	88
4.6. Hidrografia	99
5. CONSIDERAÇÕES SOBRE UTILIZAÇÃO DO MÉTODO COP ORIGINAL....	103
6. ÍNDICE DE ATENUAÇÃO NATURAL (IAN) DO SOLO CÁRSTICO DA ÁREA DE ESTUDO	106
6.1. Análise estatística para aplicação dos parâmetros analisados no IAN.....	117
6.1.1. Dendrograma.....	117
6.1.2. Análise de Componente Principal – PCA	119
7. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO COP-SOLO PROPOSTO	121
8. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	127
8.1. Solos.....	127
8.2. Ensaio de Infiltração no Solo.....	131
8.3. Método Original e COP-Solo “Camada O”	135
8.4. Fator C.....	152
8.5. Fator P.....	159
9. VULNERABILIDADE DA ÁREA ESTUDADA	166
10. CONCLUSÕES	172
11. REFERÊNCIAS	177
ANEXO 1 – FICHA DE CAMPO DAS AMOSTRAS DE SOLO UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO DO IAN	190
ANEXO 2 – CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS DO SUL DA ESPANHA.....	214

1. INTRODUÇÃO

Carste é denominado por Ford e Williams (2007) como sendo um estilo especial de paisagem onde coexistem cavernas e um extenso sistema de água subterrânea desenvolvido especialmente sobre rochas solúveis tais como calcário, mármore e gipso.

No mundo, as áreas cársticas, desenvolvem um importante papel para a sociedade, tendo em vista que em geral estão associadas a boas terras cultiváveis, guardam registros de grande parte da vida do planeta e têm grande relevância no abastecimento de água potável. Como exemplo, 50% da água potável da Áustria e Eslovênia são originárias de aquíferos cársticos e em algumas regiões europeias, as águas subterrâneas advindas desse aquífero são a única fonte de água potável disponível (COST 620, 2003). As áreas cársticas assentam cerca de 16,5% da população mundial a qual depende enormemente ou quase exclusivamente da água desses aquíferos (GOLDSCHIEDER et al., 2020). No Brasil, é estimado que 3,1 % do território nacional é coberto por carste (Auler, 2019).

Danny *et al.*, (2010) apontam que 39% dos municípios brasileiros são abastecidos exclusivamente por águas subterrâneas, enquanto 14% utilizam tanto de mananciais superficiais quanto subterrâneos. Os demais 47% dependem somente de fontes superficiais, sendo que, em Minas Gerais, 19,93% dos municípios são abastecidos exclusivamente de água subterrânea.

As áreas cársticas são extremamente sensíveis às pressões antrópicas. No que se refere especificamente à água subterrânea, o aquífero cárstico apresenta uma complexidade muito grande na recarga, armazenamento e transmissão dessa água, tornando-o mais vulnerável a potenciais contaminações. As áreas cársticas apresentam, na maioria das vezes, cobertura de solo pouco espessa, com baixa atenuação natural de potenciais contaminantes e recarga concentrada através de dolinas e sumidouros, o que pode configurar ao sistema uma alta vulnerabilidade natural.

A vulnerabilidade natural, associada às importâncias econômica, histórica, ambiental e paisagística dessas áreas justificam a necessidade de sua proteção. Dessa forma, visando a proteção desse importante recurso, Albine e Margat (1970) definiram o termo vulnerabilidade à contaminação.

Em termos gerais, a vulnerabilidade de um aquífero depende essencialmente da suscetibilidade da camada não saturada (também chamada de zona vadosa) apresentar

maior ou menor proteção à contaminação. Segundo Selker *et al.*, (1999), quase metade da água subterrânea existente no mundo, a qual se deve considerar mais da metade da água potável, é gerada por infiltração por meio da zona vadosa. Nesta camada, podem ser desencadeados vários processos de atenuação da contaminação através de mecanismos físico-químicos e biológicos característicos de cada local. Sendo assim, fatores como: mineralogia da zona vadosa, espessura, infiltração, reações tais como sorção, oxidação, precipitação, dissolução, são essenciais para a avaliação da vulnerabilidade do aquífero. No entanto, nota-se que vários métodos de avaliação não levam em consideração tais fatores.

Outro fator que deve ser considerado é a vegetação. A grande maioria das plantas depende dos nutrientes e água armazenada da zona vadosa e podem influenciar na suscetibilidade de contaminação, por exemplo, desempenhando um papel diferenciado no processo de infiltração.

A área de estudo original abrange aproximadamente 504 Km² englobando toda APA Carste de Lagoa Santa, além de extensões a norte, noroeste e leste desta região. No total a área abrange seis municípios: Lagoa Santa, Prudente de Morais, Pedro Leopoldo, Funilândia, Matozinhos e Confins.

Constituindo uma das áreas cársticas mais estudadas do Brasil, a APA Carste tem uma representação ímpar, como zona úmida, que abriga no período de migração aves de várias partes do mundo, o que a levou ao reconhecimento da sua importância ambiental, econômica, histórica e científica. Em 2017, parte da área que engloba os municípios de Pedro Leopoldo e Lagoa Santa (sítio Peter Lund Karst) foi reconhecida pela ONU (Organização das Nações Unidas) como sítio RAMSAR (área que abriga no período de migração, aves de várias partes do mundo).

Considerando a área inserida nesse contexto de expressiva sensibilidade ambiental, faz-se necessário um estudo aprofundado de um método de avaliação da vulnerabilidade capaz de prever proteção dos aquíferos à luz dos parâmetros encontrados na zona vadosa de modo a contribuir para uma gestão mais eficiente da qualidade das águas subterrâneas.

Como a maioria dos métodos de vulnerabilidade aplicado às áreas cársticas foram criados para aplicação em países europeus, surgiu a motivação de criação de um

método modificado a partir de um desses métodos. O método escolhido foi o COP¹ (VÍAS *et al.*, 2006), concebido especificamente para terrenos cársticos, onde o autor desta tese buscou realizar uma adaptação e aplicação em país de clima tropical, como o Brasil. Neste país, os estudos de vulnerabilidade e proteção dos aquíferos são poucos explorados e necessitam ser incorporados à gestão das águas subterrâneas e ao planejamento dos usos e ocupações territoriais (CONEJO, 2007).

Diante deste contexto, este estudo tem como objetivo criar uma metodologia própria ao ambiente cárstico tropical úmido cárstico e comparar os métodos original e modificado/criado (aplicados em uma mesma área) haja vista que existem poucos estudos com aplicação desse método no Brasil. Os estudos que existem fizeram uma aplicação direta do método original sem se atentar para as diferenças entre as propriedades da zona vadosa entre o carste europeu e tropical.

Dessa forma, a pesquisa trilhou caminhos em diferentes áreas do conhecimento para entendimento e aplicação das modificações propostas nesse estudo. Buscou-se compreender os processos físico-químicos que envolvem a atenuação natural fornecida pelo solo, onde os conhecimentos adquiridos na *Catédra de Edafología da Universidad de Buenos Aires*, foram importantes na construção do Índice de Atenuação Natural (IAN) desenvolvido para modificar o método original. Além de mais de 90 dias de campo, extensa pesquisa bibliográfica, buscou-se também absorver os conhecimentos adquiridos em estância doutoral realizada no *Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga-CEHIUMA* (onde são realizadas várias pesquisas avançadas para utilização no carste). Isso incluiu visitas aos locais de aplicação do método original para uma total compreensão da geologia e pedologia do sul da Espanha para posterior comparação com a área de estudo, o que enriqueceu de sobremaneira a pesquisa.

Esta tese é parte integrante de um grande estudo apoiado pelo ICMBio-CECAV², que envolve a participação de vários pesquisadores e estudantes, possibilitando o levantamento de informações utilizadas aqui para aplicação do método.

A modificação do método reflete a complexidade do carste tropical. A ausência de informações em partes da área original do projeto (504 Km²) impossibilitou o desenvolvimento dessa pesquisa na área total inicial prevista, passando para 240 Km²

¹ A sigla é um acrônimo de C=concentração de fluxo, O=camadas sobrepostas e P=precipitação.

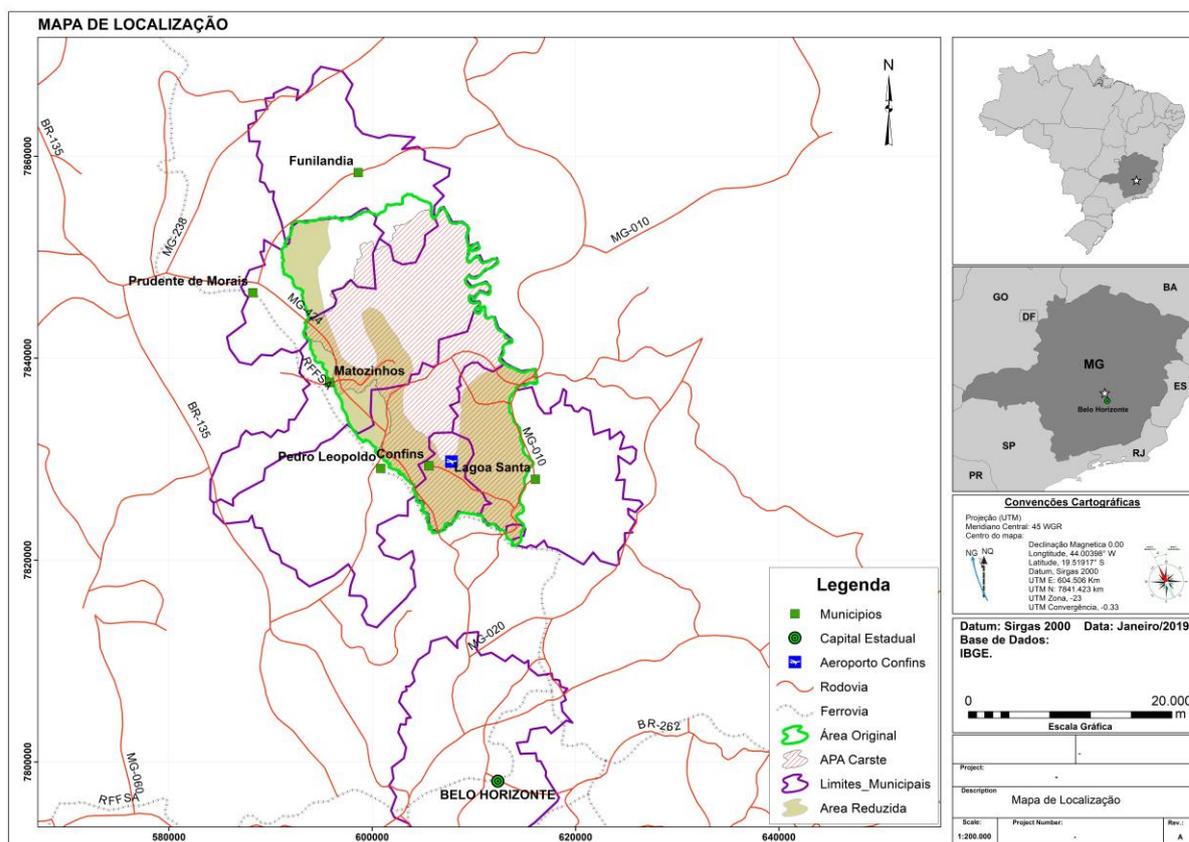
² Instituto Chico Mendes-Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Órgão governamental voltado ao estudo, proteção e manejo de cavernas, enquadrado na categoria de unidade descentralizada do IBAMA.

(área reduzida), já que a disponibilidade de informações detalhadas (não só quantitativa, mas também qualitativa, tais como as utilizadas nesse estudo) é condição “*sine qua non*” para a adaptação e aplicação do método COP.

1.1 Localização da área de estudo

Os principais acessos à área se dão pela MG-010 (ao leste) e pela MG-424 (ao oeste), conforme mostrado na Figura 1.1. A área de estudo dista em aproximadamente 50 Km ao norte da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte. Na parte interna da área, os acessos são por vias vicinais de razoável trafegabilidade no período da seca.

Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo.



1.2 Hipótese

Em que medida as diferenças encontradas na zona vadosa entre o carste mediterrâneo europeu e o carste tropical úmido permitem a aplicação direta do método COP desenvolvido para países de clima temperado?

1.3 Justificativa

Entende-se que a modificação do método COP original é de fundamental importância para a sua aplicação na condição de clima tropical. O clima influencia diretamente na gênese de formação do solo, o qual promove proteção contra potenciais contaminantes ao aquífero cárstico. Nesse sentido, a modificação do método COP visa assimilar as características dos materiais de cobertura relacionados ao clima tropical, de fundamental importância para aprimorar o entendimento do papel da zona vadosa em terrenos cársticos como aqueles presentes no carste da região de Lagoa Santa, que difere da camada protetora de países europeus e mediterrâneos.

O método COP aplicado sem a modificação necessária à realidade de clima tropical traz algumas dificuldades de aplicação direta do método em países de clima tropical, haja vista que o top soil (horizontes A+B) levado em consideração no método original tem pouca influência, conforme apontado por Zwalen (2004), por ser pouco espesso e muitas vezes inexistente. Isso difere da realidade do solo de clima tropical da área de estudo, representado em sua maioria pelos Latossolos, que possuem o solum (horizonte A+B) raramente inferior a um metro (SANTOS *et al.*, 2018). Sendo assim, os resultados podem apresentar discordâncias decorrentes da própria capacidade do solo ter mais ou menos potencial de atenuar contaminantes, e o método não exprimir a real situação local.

Até o presente momento, esse é o primeiro estudo onde se desenvolveu uma metodologia de vulnerabilidade para aquíferos cársticos para regiões de solos tropicais no Brasil.

A escolha da área do projeto sob investigação está sustentada na importância da presença da APA Carste de Lagoa Santa e seu entorno no que tange ser uma área cárstica brasileira das mais economicamente desenvolvidas e de importância ímpar em se tratando de diversidade geomorfológica, vestígios de ocupação humana pré-histórica, características hídrica e hidrogeológica e beleza cênica. Por ser uma área muito próxima a Belo Horizonte, associa-se a este cenário as grandes pressões antrópicas e econômicas que essa área vem sofrendo, mesmo tendo se tornado oficialmente uma área de proteção ambiental desde a década de 90.

A atual implementação de uma aerotrópole³, dentro dos limites da APA Carste Lagoa Santa, com alto potencial de impacto ambiental negativo associado, vem corroborar a forte demanda de conhecimento científico sólido no âmbito de prevenção e salvaguarda de um de seus mais importantes recursos ambientais, a água subterrânea. Essa nova demanda de urbanização é fomentada pelo governo estadual em resposta a um novo padrão de desenvolvimento para a região do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, conhecido como Aeroporto de Confins. O estudo de vulnerabilidade intrínseca à contaminação do sistema aquífero cárstico nesta região subsidiará métricas de gerenciamento, controle e monitoramento desse importante recurso hídrico subterrâneo, onde tais informações não devem ser negligenciadas ou simplesmente ignoradas. Dessa maneira, estudos de vulnerabilidade são importantes na regulação e ocupação da terra.

Os resultados da pesquisa poderão trazer embasamento e elementos relevantes para tomadas de decisão por parte dos órgãos gestores no que tange ao uso e à ocupação do solo com implicações na proteção qualitativa do aquífero cárstico na área estudada.

A possibilidade de estruturar uma rede de monitoramento de água subterrânea a partir dos resultados obtidos neste estudo aqui proposto, ou seja, identificação de áreas de maior vulnerabilidade poderá apontar para a necessidade de planejar/reorientar ou redimensionar a exploração econômica e o uso e ocupação do solo.

1.4 Objetivos

O objetivo geral é realizar o desenvolvimento de um método para avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos cársticos em clima tropical baseado na modificação do método COP de avaliação da vulnerabilidade intrínseca, criado para países de clima temperado e mediterrâneo, modificando-o segundo as características do carste tropical da área estudada.

O conjunto de objetivos específicos tem por base caracterizar a zona vadosa uma vez que a sua existência desempenha um importante papel na proteção da zona aquífera.

- 1) Realizar a caracterização físico-química do solo.

³ O conceito de aerotrópole apresentado no ano 2000 pelo professor estadunidense John Kasarda é entendida como uma forma de desenvolvimento urbano que inclui a aviação intensiva e empresas afins localizadas até cerca de trinta quilômetros ao seu redor.

- 2) Caracterizar o epicarste destacando as feições de absorção relevantes para recarga do tipo localizada, tais como sumidouros, dolinas e afloramentos rochosos contendo fraturas expostas abertas pela dissolução, bem como as feições de descarga, como as surgências e ressurgências cársticas.
- 3) Caracterizar a infiltração de água nas áreas de recarga difusa, com a definição da condutividade hidráulica da zona vadosa, e correlacionar sua dinâmica com o conjunto de parâmetros que proporcionam atenuação natural aos potenciais contaminantes na zona vadosa.
- 4) Avaliar a adequabilidade do método de vulnerabilidade COP tradicional às situações de carste tropical úmido, como na área de Lagoa Santa.

2. MÉTODOS

2.1 Métodos para coleta e análise laboratorial das amostras de solos

O solo é um importante parâmetro que confere atenuação de contaminantes no método proposto para a avaliação da vulnerabilidade. Sendo assim, a coleta de amostras de solos e análise dos parâmetros capacidade de troca catiônica-CTC, mineralogia, carbono orgânico-CO, pH e granulometria são de fundamental importância para auxiliar na etapa de modificação do método original COP, haja vista que a zona vadosa é a principal responsável pela proteção do aquífero.

Uma exaustiva pesquisa bibliográfica foi realizada para verificação de trabalhos anteriores executados na área objeto de estudo. Dentre eles, os mais importantes foram: HERRMANN, 1998; VIANA, 1998; SHINZATO, 1998; TANNÚS, 1994 e 1992; MENESES, 2003. Estes estudos serviram como ponto de partida para os trabalhos de amostragem.

A amostragem partiu do pressuposto da exequibilidade financeira do projeto. Desta forma, foi definido um total de 60 amostras dentro de toda a área original do mesmo (~500 Km²). A área foi dividida em quadrículas 3 Km x 3 Km, com no mínimo um ponto de coleta em cada uma.

Para o ponto de amostragem, convencionou-se: 1º) que a tipologia pedológica (levando em consideração 1º nível categórico – ordens) de maior representatividade contida em cada quadrícula fosse amostrada; 2º) que o ponto não estivesse contido em depressões cársticas e 3º) que se encontrasse fora de afloramentos, áreas urbanas e antropizadas. Vale a pena ressaltar que a área objeto de estudo se situa no vetor norte de Belo Horizonte e é uma área bastante urbanizada e em constante expansão. Sendo assim, no caso da amostragem se situar em área urbana, foi seguido o protocolo especializado do United States Geological Survey-USGS (2013) na tentativa de não perder a informação desta área. Este protocolo preconiza o deslocamento do ponto para áreas menos impactadas, por exemplo, área de parques. No caso de área intensamente urbanizada, a coleta não foi realizada.

A base onde foi lançada o plano de amostragem é o mapa de solos elaborado por Viana (1998), escala 1:50.000, dentro dos limites da APA Carste de Lagoa Santa. Como o projeto original desta tese abrangia uma área maior do que a área da APA, nas porções norte, noroeste, e oeste que não foram cobertos pelo levantamento realizado por Viana (1998), essa área precisou ser complementada com o mapeamento pedológico realizado pela UFV (2010) na escala 1:650.000. A área reduzida (Figura 2.7 do item 2.3) também manteve a necessidade dessa complementação dos mapas de solos, conforme apresentado na Figura 2.1 por também abranger partes do norte e do oeste da área de estudo original. Nas observações pedológicas realizada por Shinzato (1998) os solos da região são considerados como profundos.

Partindo do princípio que cada tipo pedológico cobre uma área de dimensões bem distintas uma da outra, o número de amostras que foram coletadas em cada tipo de solo foi proporcional ao tamanho da área coberta por cada uma delas. Sendo assim, quanto maior a área coberta de cada tipo, maior foi o número de amostras coletadas. A Tabela 2.1 mostra a distribuição de quantidade de amostras coletadas por porcentagem de área coberta por cada tipo de solo.

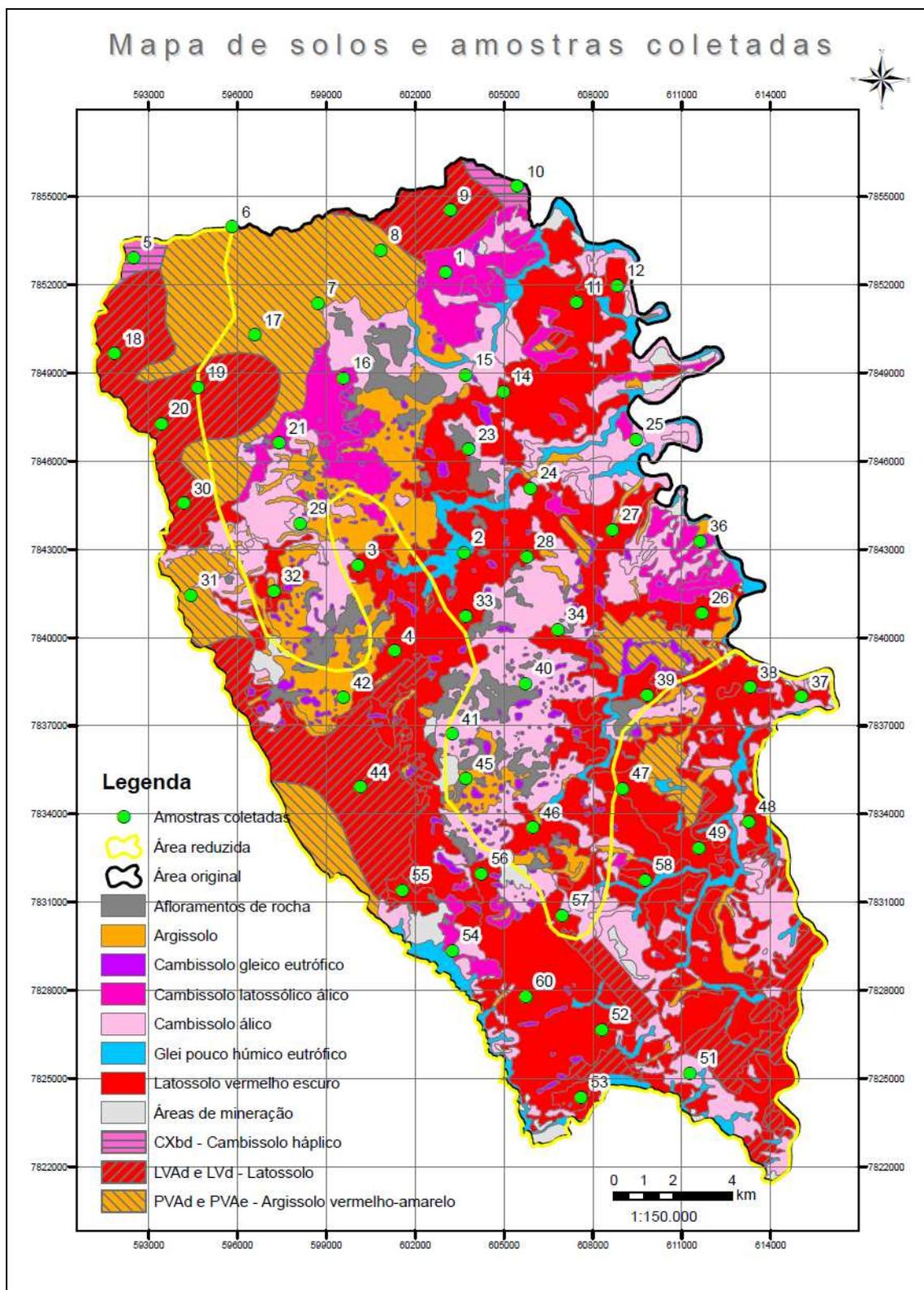
Tabela 2.1 - Distribuição de quantidade de amostras, na área original por % de área coberta.

Tipo de Solo	Latossolo	Cambissolo	Argissolo	Gleissolo
% Área	58,33	25,01	13,33	3,33
Número de amostras	35	15	8	2

Obs.: A classe de Cambissolos foi composta por Cambissolo Álico (15,02% - 9 amostras, Cambissolo Latossólico Álico (6,66% - 4 amostras) e Cambissolo Háplico (3,33% - 2 amostras).

Das sessenta amostras planejadas, foram coletadas 55 em virtude de não autorização de superficiários em cinco pontos (Figura 2.1).

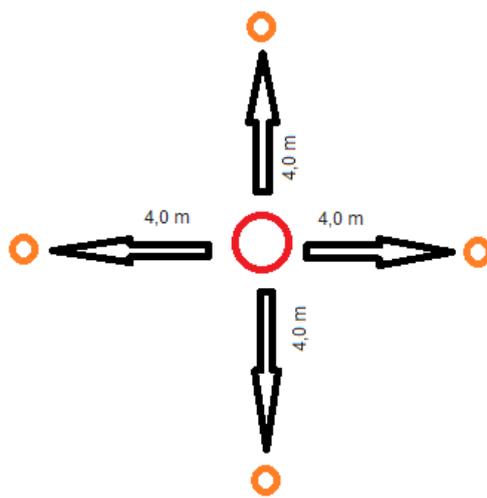
Figura 2.1 – Localização dos pontos executados (área original e área reduzida) de acordo com o tipo de solo.



Fonte: Modificado de Mapa de solos Viana (1998) e UFV (2010).

Em cada ponto amostrado foram coletadas cinco amostras de solo do horizonte B (amostra composta). Segundo Abrahão e Marques (2013), a amostra composta é constituída da seguinte maneira: uma amostra central e quatro amostras adjacentes distantes 4,0 m da amostra central para constituir uma amostra composta do solo a ser analisada, vide Figura 2.2.

Figura 2.2 - Figura esquemática de amostra composta para cada ponto.



Fonte: Modificada de Manual de Coleta de Solos para Valores de Referência de Qualidade no Estado de Minas Gerais, Abrahão e Marques (2013).

O procedimento de composição da amostra tem o objetivo de evitar erros grosseiros como àqueles que podem ocorrer na coleta de um único ponto. Afinal, tem sido verificado que o coeficiente da variação entre amostras de longa distância é muito maior do que aqueles de curta distância dentro de uma grande unidade amostral. Dessa forma, é preferível coletar vários pontos, minimamente compostos, localizados a longas distâncias do que fazer uma grande composição de subamostras que tente representar toda a unidade (Manual de Coleta de Solos para Valores de Referência de Qualidade no Estado de Minas Gerais, Abrahão e Marques (2013)). Para evitar o risco de contaminação cruzada na preparação das amostras compostas, as mesmas foram manuseadas com luvas de látex, tipo cirúrgica, bem como toda ferramenta utilizada (trados, pás, enxadões, picaretas, facas) foram previamente descontaminados através de lavagem com água entre um ponto e outro.

O horizonte B foi escolhido para coleta pelo fato de ser o horizonte que mais acumula, oriundo da lixiviação dos horizontes superiores, matéria orgânica, argila, ferro

e alumínio (VIEIRA, 1988). Estes são importantes elementos que conferem atenuação natural de potenciais contaminantes ao aquífero.

As amostras foram coletadas por meio de trado manual tipo holandês. Primeiramente, um trado tipo “calha” foi cravado no ponto central, e então medida e anotada a profundidade de inserção no solo. Em seguida identificou-se possíveis mudança de cor (uma das formas de identificação de mudança de horizonte em campo), e, a partir de então prosseguiu-se com a retirada de solo do horizonte B (Foto 2.1). A parte superior era descartada (horizonte A - zona de raízes), identificada e medida a partir da amostragem do trado de “calha” e a coleta foi realizada somente a partir da profundidade observada do horizonte B.

Foto 2.1 - Trado de “calha” sendo cravado antes da coleta das amostras (A), mostrando medidas de inserção e possíveis mudança de horizonte (B), antes da coleta das alíquotas para envio ao laboratório.



Destaca-se que em caso de solos bem friáveis, a tradagem é eficiente e rápida. No entanto, em casos de solos secos e muito argilosos, ou Argissolos com horizonte A decapitado, ou solos com argila de atividade alta ou mesmo quando o solo é epicascalhento, concrecionário ou pedregoso, o uso de trados é desaconselhável por não retirar uma amostra representativa da camada de 0 a 20,0 cm. Nestes casos, a abertura de uma minitrincheira com uma picareta ou enxadão para retirada de fatias de solo com uma faca ou pá inoxidável, após a limpeza das paredes, é uma alternativa mais viável. Quando o solo não apresentar nem 20,0 cm de profundidade, aconselha-se coletar a camada de solo disponível e anotar a espessura desta camada para que a informação seja anotada para futuras ponderações quando da interpretação dos resultados analíticos

(ABRAHÃO e MARQUES, 2013). Este procedimento não precisou ser utilizado em campo.

Como as condições de campo nem sempre oferecem uma concepção ideal de amostragem, caso fosse necessário e possível amostrar em cortes de estradas ou paredes de voçoroca de sulcos de erosão (o que não aconteceu), esta seria realizada através de trado em sentido horizontal ao corte, adentrando no mínimo 40,0 cm para o interior da “parede” evitando, dessa maneira, coleta da superfície onde fatores tais como: exposição demasiada do solo a insolação; chuvas; alternância de ciclos de umedecimento e secagem por período prolongado (o que sempre altera a sua estrutura natural); ação de máquinas, com retirada de material da superfície; compactação e espelhamentos dos horizontes; contaminação por poeira de material empregado na pavimentação (calcário, por exemplo); contaminação por metais pesados provenientes da descarga dos automóveis; existência de faixa de desmatamento com alteração da vegetação original; entre outros, podem interferir negativamente no resultado das análises (SANTOS *et al.*, 2005).

Os pontos amostrados foram previamente selecionados tomando como base o mapa pedológico e seu *shap*, e lançados em um *tablet*. No campo, ao chegar no ponto a ser amostrado, alguns deles precisaram ser deslocados até o local onde existia o tipo de solo selecionado dentro da unidade de mapeamento, priorizando a coleta de cada classe de solo existente em cada classe pedológica mapeada. O ponto teve sua coordenada marcada através de um receptor de GPS (*Global Positioning System*). Todas as amostras que compuseram a amostra composta tiveram como padrão de coordenada o ponto central. Cada amostra foi acompanhada de uma ficha cadastral de campo na qual foram anotadas as principais características do local amostrado (Anexo 1). Dentre outras informações que acompanharam cada amostra na ficha de campo, a especificação da cor e textura tomada imediatamente durante a coleta foi de fundamental importância e possibilitou no auxílio de interpretação das análises laboratoriais.

A caracterização da cor de um solo ou de seus horizontes segue uma padronização mundial - o “Sistema *Munsell* de Cores” vide (Foto 2.2), que contempla o grau de intensidade de três componentes da cor: matiz (*‘hue’*), valor (*‘value’*) e croma (*‘chroma’*), conforme especificações constantes na Carta de Cores *Munsell* para Solos (*Munsell Soil Color Charts*). O matiz se refere ao espectro dominante da cor (vermelho, amarelo, azul, verde e púrpura), o valor refere-se à tonalidade da cor e o croma diz respeito à pureza relativa ou saturação da cor. Desta forma, a caracterização da cor foi

realizada no campo, pela comparação com os padrões de cores constantes na carta de *Munsell*.

Foto 2.2 – Cores de solos comparadas tomada em campo com a Carta de Cores Munsell.



Fonte: Fotografia do autor.

Normalmente, para o horizonte B, determina-se a cor apenas com a amostra úmida. A textura, no campo, é estimada pelas sensações táteis das proporções relativas das frações granulométricas areia, silte e argila. Para isso, uma amostra de terra é umedecida e trabalhada na mão até formar uma massa homogênea sem excesso de água. Esse material, passado entre o polegar e o indicador, pode dar a sensação de aspereza, sedosidade e pegajosidade, normalmente correlacionadas com as proporções de areia, silte e argila, respectivamente (SANTOS, 2005).

Nos casos em que o ponto previamente selecionado se mostrou de difícil acesso ou impróprio para coleta devido a não autorização de proprietário da terra o mesmo foi preferencialmente deslocado até 1 Km do local original (USGS, 2013).

Em cada ponto foram coletadas sete alíquotas de amostras, as quais foram encaminhadas a diferentes laboratórios. A análise de Carbono Orgânico (CO) foi realizada por meio do método *Walkley e Black*.

As amostras submetidas à análise de Difração de Raio X (DRX) foram secas em estufa na temperatura de 60°C por 24 horas, pulverizadas em gral com pistilo de porcelana. Os resultados foram interpretados segundo as distâncias interplanares e as intensidades dos picos nos difratogramas. A amostra de referência utilizada foi o padrão do banco de dados PDF-2 Release 2010 do ICDD – *Internacional Centre for Diffraction Data e o Software X'Pert HighScore* versão 2011. O equipamento utilizado foi um difratômetro *Phillips-PANalytical* modelo *EMPYREN*, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ e monocromador.

Os procedimentos metodológicos descritos a seguir para as análises de CTC, pH e análise granulométrica foram os procedimentos utilizados pelo laboratório e transcritos do manual elaborado por CAMARGO *et al.*, 2009.

A Capacidade de Troca de Cátions (CTC) a pH 7,0 (CTC a pH 7,0) foi calculada pela soma dos teores de Ca^{++} , Mg^{+} , K^{+} , Al^{+++} e H^{+} , determinados na análise. Esta representa a quantidade máxima de cargas negativas que o solo possui e que poderiam permitir a troca por cátions. A CTC a pH 7,0 é, portanto, um valor calculado a partir dos valores individuais dos cátions.

O pH é um importante parâmetro a ser analisado no solo, haja vista que tem influência direta nos processos de atenuação natural de potenciais contaminantes na zona vadosa, como por exemplo, CTC e adsorção. O pH foi determinado em água e em solução de KCl 1N e CaCl_2 .

A determinação do pH em KCl 1N e em água foi realizada por meio da transferência de 10 cm^3 de terra para um cilindro plástico com tampa (4 x 4 cm). Em seguida, foi adicionado, para determinação do pH em água, 25 ml de água destilada e, separadamente, para o pH em KCl 1 N, 25 ml da solução de KCl 1N. Agitou-se mecanicamente durante quinze minutos e após 30 minutos se procedeu à leitura. O eletrodo de vidro, ou a parte a ele correspondente num eletrodo combinado, ficou no líquido sobrenadante. O pH foi lido sem agitação, depois de atingido o equilíbrio (30 minutos). Antes das mensurações, o medidor de pH foi calibrado com as soluções tampão para pH 4,0 e 7,0. A cada quinze a vinte leituras, o peagâmetro foi calibrado novamente com uma das soluções tampão. Lavou-se o eletrodo entre uma e outra determinação com água destilada por meio de uma pisseta e foi enxugado, evitando raspar o papel absorvente no eletrodo de vidro.

A determinação do pH em solução 0,01 mol L^{-1} de CaCl_2 é em média 0,6 unidade menor do que o pH em água, embora as diferenças sejam bastante variáveis. O

método consiste em transferir, através de cachimbo, 10 cm³ de terra para um frasco plástico e em seguida adiciona-se 25 ml da solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, deixando 15 minutos em contato. Agita-se a suspensão por 10 minutos a 220 rpm, usando agitador com movimento circular horizontal ou agitador de pH (decantando depois por 30 minutos). Em seguida, ajusta-se o medidor de pH com as soluções-tampão de pH 4,0 e 7,0 e, frequentemente, com uma dessas soluções, após a determinação de uma série de amostras. Sem agitar, mergulha-se o eletrodo combinado na suspensão, de modo que a ponta do eletrodo de vidro toque ligeiramente a camada de sedimento e a saída do eletrodo de referência fique submersa, lê-se o pH após estabelecido o equilíbrio. Destaca-se que o eletrodo foi lavado com água e enxugado com papel absorvente, após cada determinação. Isso é importante quando se passa para uma suspensão de pH muito diferente, ou de solução-tampão para suspensão de solo. Para valores de pH elevados, o equilíbrio leva algumas dezenas de segundos para ser obtido. Movimentos do eletrodo ajudam a estabelecer o equilíbrio, embora não é recomendado agitar a suspensão.

A análise granulométrica foi determinada através do método da pipeta, com separação nas frações de areia grossa, areia fina, silte e argila. O método consiste em completar o volume da proveta a 500 ml, agitar a suspensão por 30 segundos com um bastão que contém na extremidade inferior um êmbolo de borracha com diâmetro um pouco menor que o do cilindro, com movimento da boca para o fundo e vice-versa. Em seguida, anota-se o tempo (t), e transcorrido o tempo necessário para a sedimentação da argila+silte e argila, conforme a lei de *Stokes*. Posteriormente, introduziu-se uma pipeta de 10 ml a uma profundidade de 10 cm para amostragem de argila+silte e de 5 cm para amostragem de argila, com sucção contínua para evitar turbilhonamento (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Tempo necessário, a diferentes temperaturas, para sedimentação de partículas de solo com peso específico de 2,65. Para a argila considerou-se partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm.

Temp. °C	Argila (5 cm)		Argila + Silte (10 cm)	
	Horas	minutos	minutos	Segundos
10	5	13	6	14
11	5	05	6	03
12	4	55	5	54
13	4	48	5	44
14	4	40	5	35
15	4	33	5	27
16	4	25	5	19
17	4	18	5	10
18	4	13	5	03
19	4	05	4	55
20	4	00	4	48
21	3	55	4	41
22	3	50	4	34
23	3	43	4	28
24	3	38	4	22
25	3	33	4	15
26	3	28	4	10
27	3	23	4	04
28	3	20	3	59
29	3	15	3	54

Fonte: IAC⁴.

Transferiu-se as alíquotas para cápsulas de porcelana previamente taradas (com aproximação de 0,0001g) e foi seca à 105-110°C por no mínimo oito horas. Foi repetido o procedimento com a prova em branco, contendo a solução dispersante e água destilada. As cápsulas foram retiradas da estufa, esfriadas em dessecador contendo cloreto de cálcio anidro e pesadas rapidamente em balança com precisão de décimo milésimo de grama, para obter o peso da argila + dispersante (A+D) e da argila + silte + dispersante (A+S+D). Os resultados foram expressos em porcentagem da terra fina seca ao ar (TFSA). Das alíquotas pesadas, subtraiu-se o peso do dispersante que, no caso descrito, corresponde a cerca de 0,014g. Cálculos:

Argila (%) na TFSA = [peso da argila + dispersante (A+D) - peso do dispersante (D)] x 500

⁴ Obs.: onde (1) Equação de Stokes: $v = (2/g) \times g \times r^2((D_p - D_{sol})/\eta)$ $g = 980,7 \text{ cm/s}^2$; r = raio da partícula; D_p = peso específico da partícula (no caso = $2,65 \text{ g/cm}^3$); D_{sol} = peso específico da solução e η = viscosidade da água à temperatura considerada.

Silte (%) na TFSA = [peso da argila + silte + dispersante (A+S+D) - peso da argila (A) - peso do dispersante (D)] x 500

Areia grossa (%) na TFSA = peso da areia grossa (AG) x 10

Areia fina (%) na TFSA = 100 - (% argila + % silte + % areia grossa)

Observação: o silte é obtido por diferença quando se utiliza a peneira 0,053 mm.

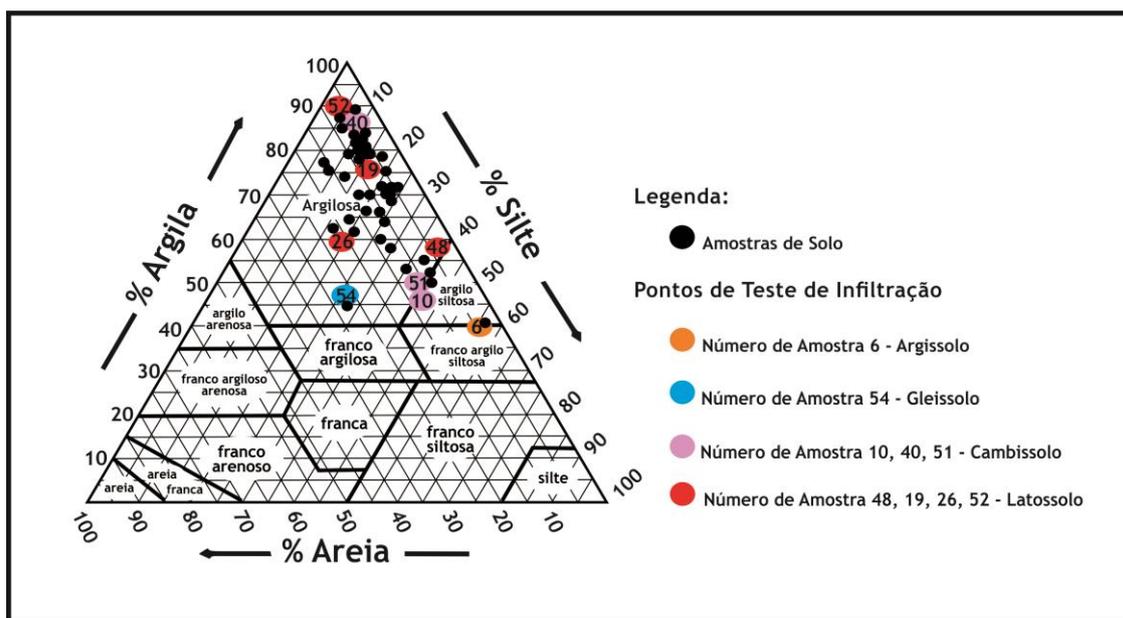
A coleta e análise do material tiveram como objetivo final a representação de cada unidade de mapeamento, para verificação das condições de atenuação natural do solo a potenciais contaminantes. Dessa forma, será possível verificar, ao final do mapeamento de vulnerabilidade, qual tipologia é mais propensa a atenuação de potenciais contaminantes associada ao valor da escala de vulnerabilidade (apropriada no final do estudo). Portanto, a escolha dos locais para a coleta de material foi precedida do cuidado em escolher locais representativos e que permitissem caracterização adequada da referida classe de solo, o que só foi possível após os trabalhos de campo. Seguiu-se a recomendação de não amostrar solo em locais de transição entre unidades de mapeamento pedológico, quer por diferenciação de classes de solo, quer por variações de fase de relevo e/ou de vegetação. Do mesmo modo, locais muito revolvidos, como áreas de empréstimos e cascalheiras ou próximos a construções atuais ou antigas, assim como margens de estradas, ferrovias e rios, também foram evitados (SANTOS, 2005).

2.2 Método para ensaio de infiltração

Os pontos escolhidos para os ensaios de infiltração foram os mesmos pontos onde houveram as coletas de amostras de solo para análises físico-químicas. Primeiramente, foi realizada uma distribuição das amostras de solo para análise laboratorial, conforme o item 2.1. A partir dos resultados, foi realizada a classificação textural das mesmas, onde foi verificada uma “uniformização” dos dados nas classes argilosa a muito argilosa (Figura 2.3). Mesmo não tendo modificação de classe em nenhuma amostra, no triângulo textural observou-se uma diferenciação entre elas quanto às percentagens de silte, areia e argila e tipo de solo. Sendo assim, esses pontos foram escolhidos em virtude dessa diferenciação, onde se pode observar que a textura, mesmo nessa “uniformização”, mostrou diferentes valores de condutividade hidráulica, conforme será apresentado no item 8.2.

Procurou-se ensaiar todos os tipos de solos existentes, extrapolando posteriormente para aquela classe de solo ensaiada a condutividade hidráulica que contém o mesmo tipo de solo. Onde os resultados foram diferentes para a mesma classe de solo como, por exemplo, nos Pontos 40, 51 e 10 (Cambissolo), adotou-se como referência, para a extrapolação aos demais pontos com essa mesma classe, a maior condutividade hidráulica, ou seja a pior situação para a atenuação.

Figura 2.3 - Classificação textural das amostras de solo com os pontos escolhidos para os ensaios de infiltração.



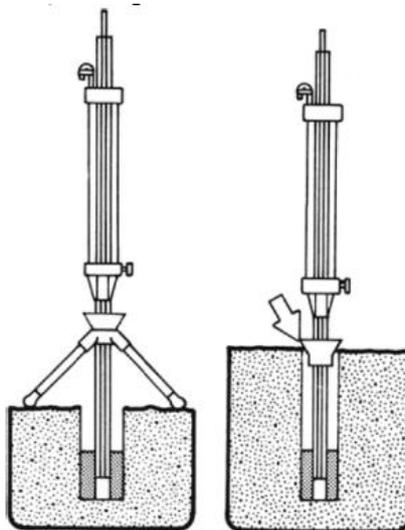
Fonte: Triângulo textural modificado de USDA, 2017-United States Department of Agriculture.

O método escolhido, foi o de carga constante realizado por meio do Permeâmetro de Guelph desenvolvido por Reynolds *et al.*, (1983), depois aperfeiçoada por Reynolds e Erick (1985) para determinar, *in situ*, a condutividade hidráulica saturada (k_{fs}).

O equipamento utilizado foi o modelo 2800K1 da *SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP.* Ele opera utilizando carga constante empregando o Princípio de *Marriotte*. O aparelho permite, a partir da saturação do solo, conhecer a condutividade hidráulica, K_{fs} , mantendo uma carga hidráulica constante. Para a condução dos ensaios, foi realizado um furo de 0,20 m de profundidade com diâmetro de 5,0 cm. O aparelho foi montado e instalado para as medições em estado estacionário, mantendo uma carga constante e medindo, em intervalos de tempo regulares, a altura de água dentro do

reservatório. As cargas utilizadas foram de 5,0 cm e de 10,0 cm, sendo um ensaio seguido do outro. A Figura 2.4 mostra o equipamento montado para início do ensaio. Quando a absorção se equilibrou, mantendo quatro medições constantes, o ensaio foi dado como finalizado.

Figura 2.4 - Figura esquemática do Permeâmetro de Guelph após instalado e pronto para a execução do ensaio.



Fonte: *Guelph Permeameter operating instructions SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP.*

Nos ensaios, procurou-se definir a condutividade hidráulica em pontos representativos de todos os tipos de solos encontrados na área de estudo.

Foto 2.3 - Ensaio realizado no Ponto 52.



Depois de coletados os dados no campo, utilizando a equação para *One Head Analysis*, foi feito o cálculo de K_{fs} :

$$K_{fs} = \frac{C \cdot Q}{2\pi H^2 + \frac{2\pi H}{\alpha} + \pi C a^2} \text{ onde:}$$

C = Fator de forma (-);

Q = vazão a carga constante (L^3/T);

H = altura de água constante (L);

a = raio do furo (L);

α = constante em função das propriedades do solo (1/L).

O parâmetro α pode ser estimado visualmente em campo ou através de análise textural do solo. Os valores sugeridos por Elrick *et al.*, (1989) para se estimar esses valores estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores de α para diferentes tipos de solo.

α (cm ⁻¹)	Tipo de solo
0,01	Argilas compactas (Aterros, liners, sedimentos lacustres e marinhos)
0,04	Solos de textura fina, principalmente sem macroporos
0,12	Argilas até areias finas com alta a moderada quantidade de macroporos e fissuras
0,36	Areia grossa, inclui solos com macroporos e fissuras

Fonte: Elrick *et al.*, (1989).

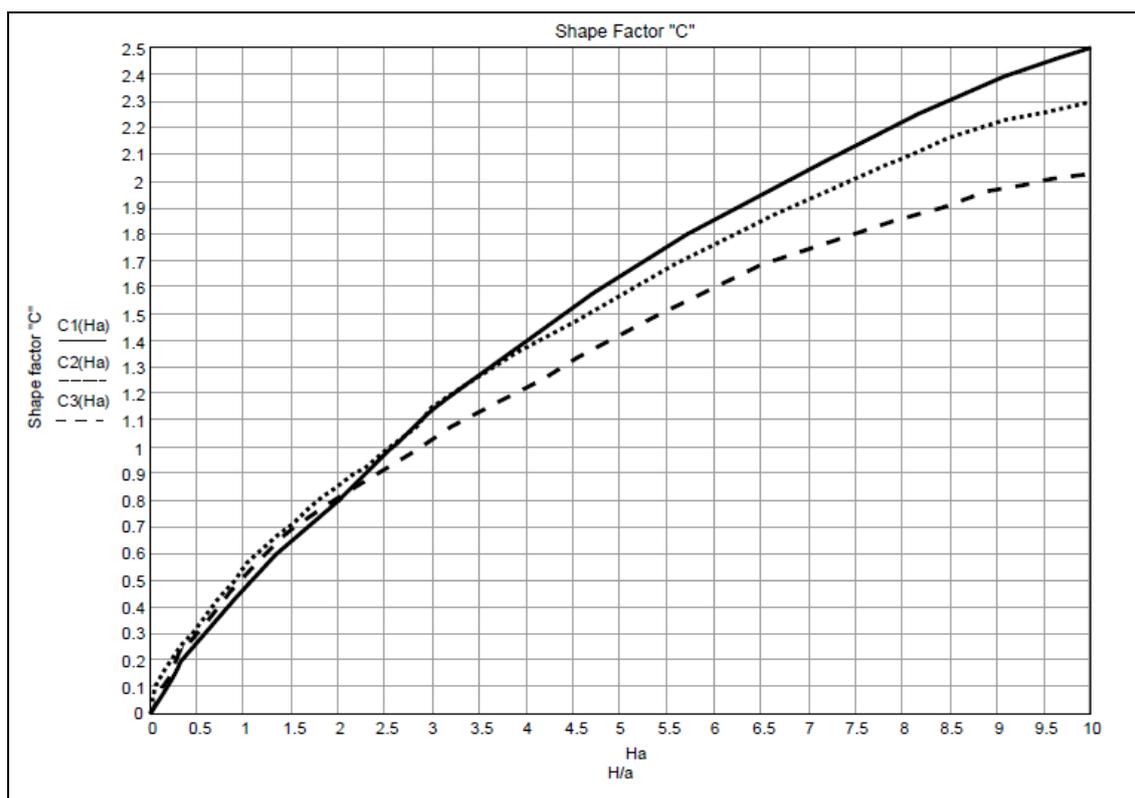
Exceto para o Ponto 54 (Gleissolo), onde foi utilizado o fator de $\alpha = 0,01$, para todos os demais foi utilizado o fator $\alpha = 0,04$.

O parâmetro Q é obtido através da expressão: $Q = A \cdot R_i$, onde Q é a vazão em regime permanente e A é a área da seção transversal do permeâmetro (sendo 35,18 cm² para o reservatório combinado e 2,11 cm² para o reservatório interno). Excetuando o Ponto 54, em todos os pontos foi utilizado o reservatório combinado. R_i é a vazão de diminuição do nível de água no reservatório utilizado para o ensaio, obtido através da velocidade de infiltração no intervalo de tempo determinado para o mesmo. Quando a mudança na altura de água (cm) permaneceu constante por três ou mais vezes, considera-se que o ensaio atingiu o estado estacionário.

O Fator de Forma C depende do tipo de solo e da razão H/a, em que a curva C1 é utilizada quando $\alpha \geq 0,12$ cm⁻¹, C2 quando $\alpha = 0,04$ cm⁻¹ e C3 quando $\alpha = 0,01$ cm⁻¹, H é a altura do nível constante submetida no furo (5,0 cm e 10 cm) e corresponde ao raio do furo (2,5 cm). A Figura 2.5 a seguir mostra o ábaco para definição do Fator de Forma C.

Foi utilizado o *software Hydrus 1-D* na tentativa de verificação da condutividade hidráulica aplicando os resultados de textura das amostras de solos, porém, como o *software* possui um banco de dados de países diferentes do clima tropical, ou seja, métodos desenvolvidos para outros tipos de solos não são necessariamente aplicáveis para os tipos de solos tropicais, logo os resultados não foram compatíveis. Dessa maneira descartou-se a sua utilização. Isso mostra a dificuldade e o perigo de se importar “facilidades” que não foram elaboradas para nosso país, pelo menos para essa ferramenta do *software*.

Figura 2.5 - Fator de Forma C.



Fonte: Soilmoisture Equipment Corp. (2008).

O resultado para K_{fs} foi obtido pela média das cargas de 5,0 e 10,0 cm para cada ensaio.

2.3. Método para elaboração dos mapas da zona vadosa e de solos

A determinação da zona vadosa (solo e rocha) foi realizada por meio de uma extensa pesquisa documental envolvendo a compilação dos dados existentes em perfis litológicos de poços perfurados da área de estudo. Estes dados foram levantados pela equipe do projeto maior em arquivos físicos e eletrônicos de instituições mantenedoras de dados referentes aos recursos hídricos subterrâneos (IGAM - Instituto Mineiro de Água, SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável e SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas). Informações adicionais foram obtidas junto a companhias particulares de perfuração de poços.

Foram avaliados 827 poços para aquisição de dados relativos à espessura de solo e/ou rocha. Informações como o nível estático - N.E., coordenadas geográficas e perfil litológico foram consideradas essenciais para a confecção dos mapas que posteriormente tiveram aplicação na elaboração do Índice de Atenuação Natural - IAN.

A descrição de rocha alterada não foi considerada como constituinte no IAN como solo, bem como para a confecção do mapa de espessura de solo.

Uma dúvida surgiu no momento da definição da zona vadosa: seria utilizado o parâmetro entrada de água ou nível estático para essa caracterização? A resposta surgiu através da aplicação de uma simulação matemática, apresentada no item 9.

Desta forma, dos 827 poços analisados poucos continham todas as informações necessárias para sua utilização. A Tabela 2.4 exhibe esta relação destacando o número de poços que realmente serviram ao propósito da aplicação do método aqui estudado. A qualidade e a quantidade dos dados, assim como a sua distribuição espacial são fatores de extrema importância que devem ser considerados na utilização do método escolhido.

Tabela 2.4 - Quantidade de poços utilizados como pontos na elaboração dos mapas de solo e Zona Vadosa.

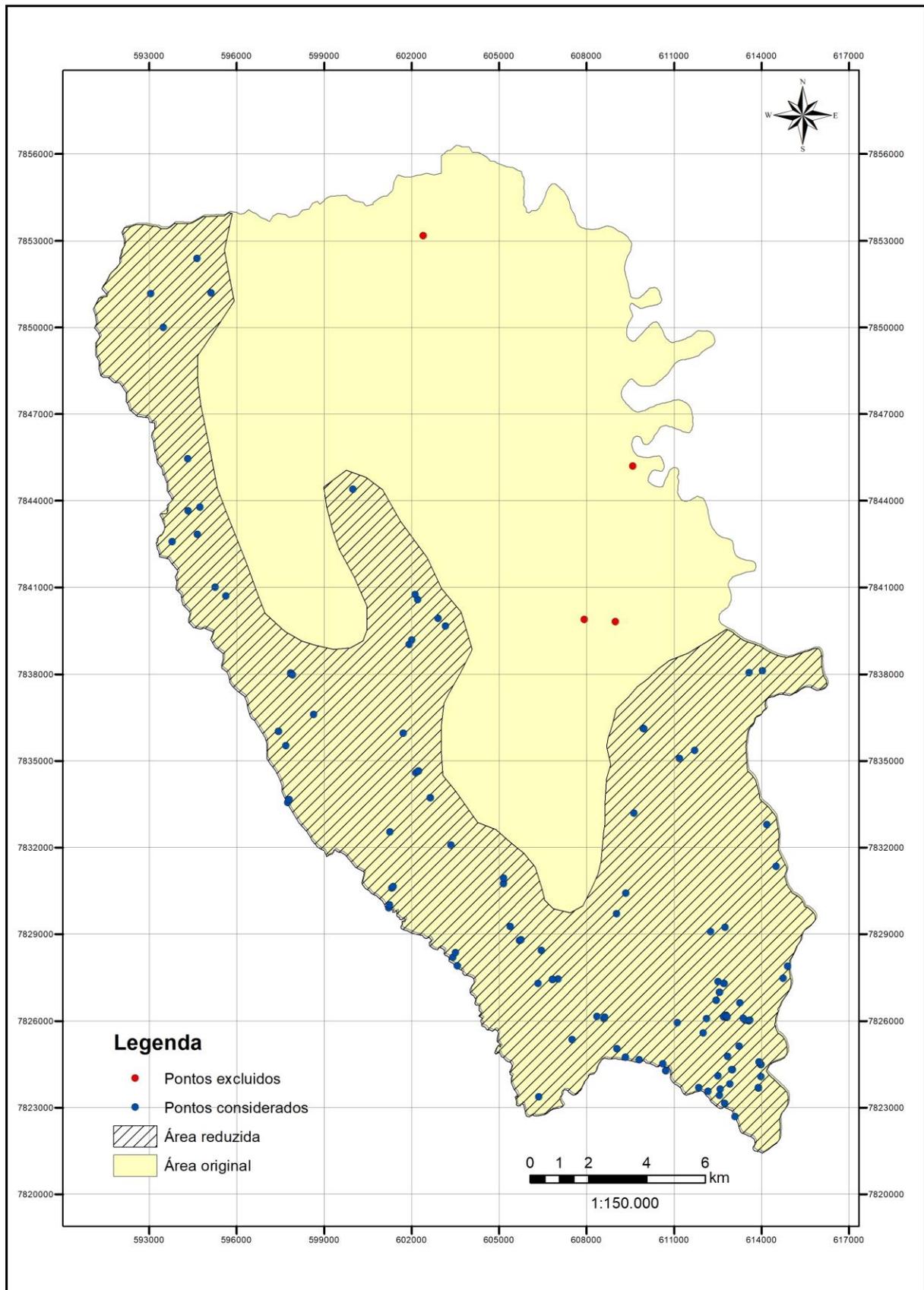
Total de poços analisados - 827			
Zona Vadosa-ZV-Total de poços 424		Espessura de Solo-Total de poços 205	
Pontos dentro da área original	Pontos dentro da área reduzida/redefinida	Pontos dentro da área original	Pontos dentro da área reduzida/redefinida
218	120	129	120

A análise da distribuição espacial dos poços levou à redefinição da área de estudo uma vez que em 260 Km² havia somente quatro pontos (Figura 2.6). Para não comprometer a qualidade da pesquisa, e para que uma grande área praticamente sem informação interferisse negativamente nos resultados, optou-se por reduzir a área estudada para 240 Km², mantendo uma melhor acurácia dos resultados. A espessura de solo foi considerada zero nos locais de afloramentos, os quais foram imageados por meio do software ®GoogleEarth e verificados em campo.

Foi realizada uma simulação, na tentativa de não cortar a área original do projeto utilizando os quatro pontos existentes em 260 Km² com informações de poços tubulares profundos, complementando com os pontos gerados sobre as drenagens perenes existentes nessa área. Dessa maneira, a partir do MDE (Modelo Digital de Elevação) do terreno, foi determinada a superfície do terreno onde correm esses cursos d'água como sendo a superfície de espelho d'água. Posteriormente, foi definido a partir desse espelho d'água qual seria a profundidade do curso d'água e a diferença entre a profundidade e espelho d'água foi definida como espessura de solo (aproximação) gerando dessa forma um mapa de espessura de solo para a área total. Para verificação da acurácia dos

resultados, foram comparados os mapas de espessura de solo levando em consideração o mapa de espessura de solos para área reduzida e para área original. Os cursos d'água tiveram suas superfícies interpoladas a partir de uma nuvem de pontos gerada a partir da imagem ALOS Palsar com resolução espacial de 12,5 m com a aplicação da ferramenta *Raster to point* disponível no programa ArcGIS 10.3.

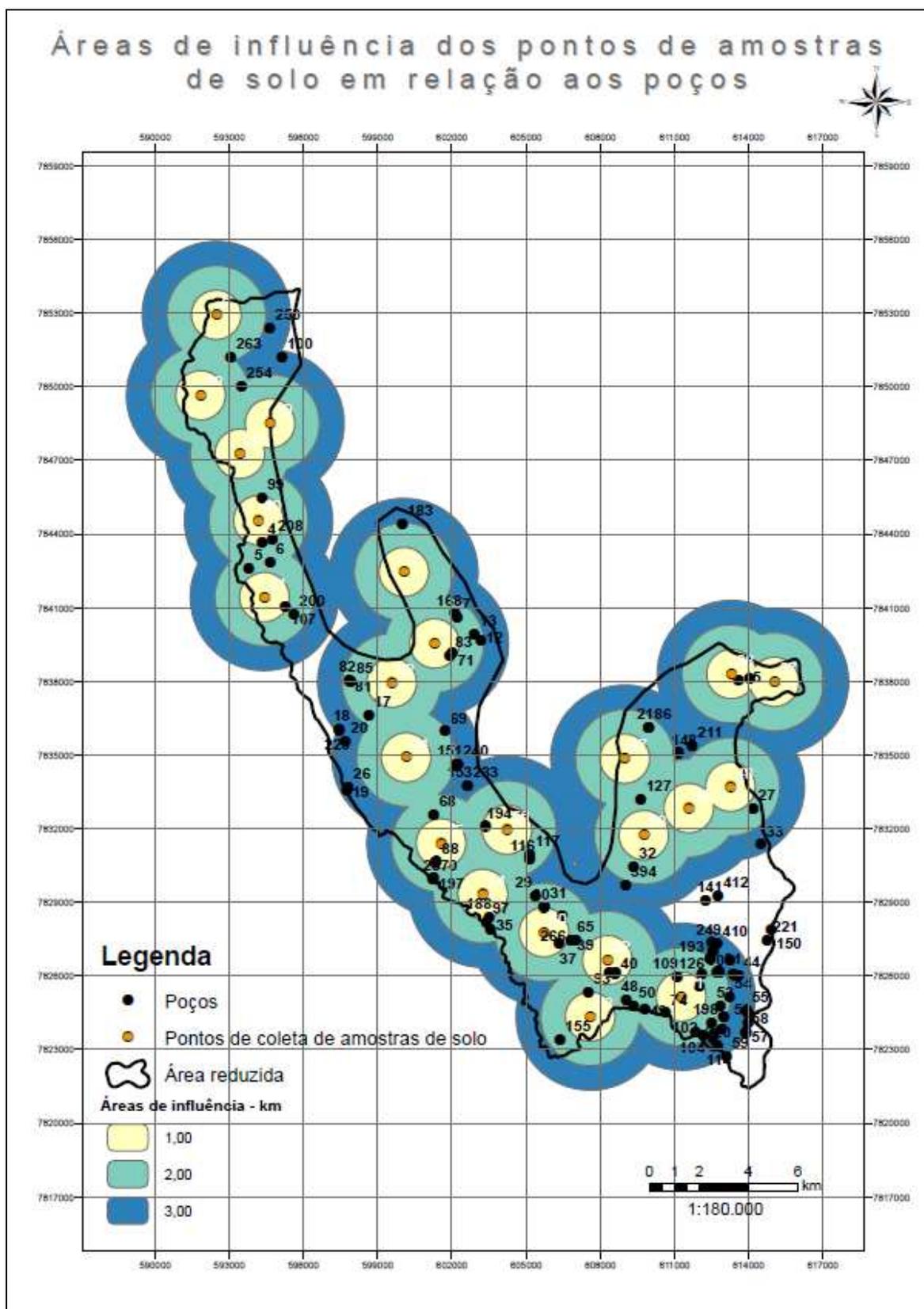
Figura 2.6 - Mapa redefinido da área de estudo a partir de dados de poços tubulares.



Para a elaboração dos mapas da zona vadosa e da espessura de solo foi utilizado uma nuvem de pontos, gerada a partir da imagem ALOS Palsar com resolução espacial de 12,5 m com a aplicação da ferramenta *Raster to point* disponível no programa ArcGIS 10.3. Esta nuvem de pontos, utilizando o mesmo programa, após um processo de interpolação (*Topo to raster*), permitiu a confecção de uma superfície hipsométrica. Procedimentos similares foram realizados para os pontos da zona vadosa e solo, oriundos dos dados obtidos conforme explicado anteriormente que gerou as superfícies das espessuras correspondentes de solo e zona vadosa.

Com a retirada da área que não detinha informações necessárias à elaboração dos mapas de espessuras de solo e zona vadosa, foi obtida uma boa qualidade das informações necessárias para a construção dos mapas a partir dos poços analisados. A Figura 2.7 mostra as distâncias dos poços, que geraram as informações, em relação aos pontos onde foram coletadas as amostras de solo para análises físico-químicas.

Figura 2.7 - Mapa da distância dos poços até os pontos de coleta de amostras de solo.



Desta maneira, conseguiu-se assegurar qualidade dos dados para elaboração dos mapas de solo e zona vadosa que subsidiaram a construção do IAN.

2.4. Método para elaboração do mapa P

Para elaboração do mapa P foram utilizados dados de quatro estações; Sete Lagoas, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Vespasiano; todas pertencentes à ANA (Agência Nacional de Águas), exceto a estação de Sete Lagoas que pertence ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Considerou-se a série histórica de 35 anos de dados de pluviometria. Como não há variação de altitude importante na área estudada, a média anual da série histórica foi obtida a partir dos dados da série histórica e não de um mapa de isoietas. |A partir daí, foi calculada a média para os anos úmidos e os cálculos para obter os valores de P_Q e P_I que resultaram no mapa P. Utilizou-se o programa ArcGIS 10.3 para elaboração do mapa.

2.5. Método para elaboração do mapa C

2.5.1. Mapas sv

A elaboração do mapa sv (*slope e vegetation*) levou em consideração os estudos elaborados por Pereira (2018), onde os mesmos levantaram a evolução do uso do solo e das atividades potencialmente poluidoras na região da área de estudo. Esse levantamento foi realizado a partir de imagens *Landsat*, com resolução de 30,0 m para as bandas multiespectrais.

Para a etapa de classificação, a autora supracitada, utilizou o método de classificação supervisionada. Tal método considera que o pesquisador já detém um conhecimento prévio da área, onde foram realizados seis dias de campo e levantados 120 pontos de controle que auxiliaram na classificação das imagens (utilizando o algoritmo de Máxima Verossimilhança-MAXVER, onde os pixels foram ordenados de acordo com a maior probabilidade, considerando a distribuição das classes) (PEREIRA, 2018).

As classes utilizadas por este trabalho, a partir da classificação de Pereira (2018) foram: agropecuária, água, eucalipto, cobertura vegetal nativa e área desnuda e outros

usos. Além disso, foi realizada uma reclassificação para adequação da metodologia COP para: área desnuda e água (peso 1), alta-cobertura arbórea e eucalipto (valor 100) e baixa-pastagem e agricultura (peso 10).

Para os valores de declividade foi criada a reclassificação: $\leq 8-31\%$ (peso 1), 8-31% (peso 2), 31-76% (peso 3) e $> 76\%$ (peso 4).

Após os cálculos obtidos com os valores reclassificados foram dados os valores de SV do método para cada entrada dupla dos parâmetros declividade/vegetação e elaborado os mapas SV.

2.5.2. Mapa C

Para elaboração do mapa C cenário 1 foram utilizados os dados de sumidouros e outras estruturas que oferecem trânsito direto para água de precipitação, onde foram considerados os afloramentos de maciços calcários como o principal compartimento geomorfológico detentor dessas geoestruturas que leva em conta condições geomorfológicas (fraturas, sumidouros, *shafts*, etc.) que controlam o fluxo de infiltração rápida para o aquífero, onde a capacidade de atenuação de potenciais contaminantes é baixa.

Devido à baixa declividade encontrada na área de estudo, não foi possível a delimitação automática das bacias vertentes aos sumidouros. Assumiu-se que as bacias seriam as áreas de acumulação de água pelas depressões cársticas que estão diretamente relacionadas aos afloramentos de calcário, sendo assim semelhante à de uma bacia hidrográfica. Essa mesma metodologia está em consonância com a metodologia assumida por Amaral (2018). Assim, foi assumido como uma aproximação aceitável para o cálculo do fator C que as depressões que não acumularam água durante a análise realizada por Amaral (2018) foram consideradas como infiltração direta e as que acumularam foram consideradas como infiltração difusa.

O mapa C cenário 2 levou em consideração a litologia onde os eventos de infiltração ocorrem. Sendo assim a Formação Serra de Santa Helena, Complexo Gnáissico Migmatítico, Depósitos Lateríticos-Detríticos, Depósitos Aluviais e Depósitos Conglomeráticos foram classificados como terrenos não cársticos. Já o Membro Pedro Leopoldo como pouco carstificado e o Membro Lagoa Santa como um carste bem desenvolvido. As depressões onde foi detectado acúmulo de água,

considerando um ano normal de regime hídrico (2010) por Amaral (2018), foram consideradas impermeáveis e as que não acumularam como permeáveis.

O mapa final C foi gerado levando em consideração os dois cenários.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Solo

A definição de solos vem sofrendo algumas alterações ao longo dos anos. A partir da visão mais comum, sob o ponto de vista pedológico, o solo pode ser subdividido em subcompartimentos e é formado sob influência do clima, organismos, material de origem, relevo e tempo (BOCKHEIM, 2005).

Solo é a superfície inconsolidada que recobre as rochas e mantém a vida animal e vegetal da Terra. É constituído por camadas/horizontes que diferem pela natureza física, química, mineralógica e biológica e que se desenvolvem com o tempo sob influência do clima e da própria atividade biológica. O solo é o resultado da ação conjunta dos agentes intempéricos sobre restos minerais depositados e enriquecidos de detritos orgânicos. É, portanto, um processo natural de acumulação e evolução dos sedimentos minerais, aos quais se vão juntando lenta e progressivamente restos e produtos orgânicos, pois a sua formação tem início no momento em que as rochas entram em contato com o meio e começam a sofrer transformações com intensidade tal que depende diretamente dos agentes do intemperismo (VIEIRA, 1988).

Segundo Fassbender (1994), o intemperismo provoca alterações na proporção mineralógica do solo. Aqueles que são mais resistentes a intemperização se acumulam gradativamente como, por exemplo, o quartzo, alguns óxidos de ferro e alumínio e o ortoclásio. Esta acumulação é mais evidenciada nas frações de silte e areia, já que nas argilas predominam os minerais secundários formados no transcurso do intemperismo. É sabido que nos solos mais antigos não há a presença de minerais primários devido ao intenso processo de intemperismo sofridos por estes. Os minerais primários existentes no solo estão na forma cristalina, sendo os silicatos a classe representativa desses, embora também existam outros (FASSBENDER, 1994).

O solo é composto por camadas denominadas horizontes. Esses horizontes são formados por complexas interações dos processos que ocorrem durante o intemperismo. Quando a chuva percola através do solo, ela transporta substâncias dissolvidas e

coloidais para os horizontes inferiores. Processos biológicos, como por exemplo ação das bactérias no apodrecimento da biomassa, produzem ácido carbônico em menor quantidade e complexos compostos que vão interagir com as argilas e outros minerais presentes nos horizontes inferiores alterando as propriedades desses minerais. A camada superior do solo (alguns centímetros de espessura) é chamada de horizonte A. É a camada de máxima atividade biológica no solo e contém a maior parte da matéria orgânica. Íons metálicos, partículas de argila, matéria orgânica e sais oriundos do horizonte A são lixiviados para o horizonte B (MANAHAN, 2001).

Nesse sentido, o epicarste ou zona subcutânea, assume um papel de destaque no que se diz respeito a esses materiais, haja vista que se encontram em contato direto com a rocha solúvel subjacente, influenciando a circulação hídrica interna e a elaboração da morfologia rochosa coberta, como também o exocarste e o endocarste (PILÓ, 2000).

O material de origem ou rocha matriz é o de maior importância na formação dos solos, porém quando se trata de solos de origem cárstica há controvérsias quanto à sua formação. Alguns autores (JI *et al.*, 2004; FENG; CUI; ZHU, 2008) sustentam a teoria de origem autóctone e outros alóctone (CAO *et al.*, 2016; SHINZATO, 1998), para estes solos. A defesa da origem alóctone desses autores ressalta que quantidades muito pequenas de material insolúvel nos calcários não são suficientes para formação de solos nas áreas cársticas, sugerindo assim que são formados de materiais alóctones.

Segundo Shinzato (1998), os solos da APA Carste de Lagoa Santa são solos profundos de estrutura granular e ultra fina granular ou se apresentam em blocos cuja relação sólido-vazios é bem diferenciada dos solos de influência direta do calcário. Além disso, apresentam baixa atividade das argilas, baixa relação sílica/sesquióxidos e baixos valores de bases trocáveis, inclusive de cálcio e magnésio. Aliados à dominância da caulinita e gibbsita na mineralização da fração argila, são indícios de solos mais intemperizados e possivelmente desenvolvidos de sedimentos recentes retrabalhados do que do material geológico autóctone.

O solo desempenha um papel importantíssimo no que se diz respeito aos métodos de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, haja vista que é nessa camada que ocorrerão os processos de atenuação de potenciais contaminantes. Conforme apontado por Azevedo (2018) os diferentes métodos de vulnerabilidade dos aquíferos existentes na literatura, foram criados para aplicação em clima temperado onde a pedogênese é menos intensa e rápida gerando solos menos profundos, com maior teor de argila 2:1 e menos estruturados. Por esse motivo necessitam de adequações para

serem utilizados em solos tropicais, os quais apresentam mineralogia dominada por argilas 1:1, óxidos-hidróxidos e são muito estruturados, o que modifica de forma significativa seu comportamento com relação à função de proteção dos aquíferos.

3.1.1. Solos Mediterrâneos e Europeus vs. Solos Tropicais em Áreas Cársticas

Faz-se necessário uma analogia sobre os solos tropicais em áreas cársticas e solos mediterrâneos e europeus pelo simples fato de que a metodologia COP foi desenvolvida para avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos cársticos baseado na abordagem proposta pela *COST (European Cooperation in Science and Technology)*.

Essa abordagem foi desenvolvida para ser aplicada a aquíferos cársticos, definida para ser geral, flexível e não preceptiva (ZWALEN, 2004). Ela foi a base para os métodos adaptativos provenientes dela como, por exemplo, o método COP, o qual é apropriado para áreas cársticas europeias, desde os Alpes às terras baixas, mediterrâneo até os continentes (POLEMIO, 2009). No item 3.5.1 é realizada uma descrição sucinta desse método, o qual foi aplicado em países mediterrâneos como Espanha (VIAS *et al.*, 2006) e Itália (POLEMIO, 2009).

Outro método inspirado pela metodologia criada pela *COST* (2003), porém desenvolvido por instituições alemãs (PI), é similar ao método COP, em que os parâmetros P (fator de proteção em função da espessura do solo) são similares ao parâmetro O do método COP e o parâmetro I é similar ao parâmetro C. Isso demonstra a extensão e aplicação desses métodos oriundos da abordagem *COST* em países europeus.

Isso posto, o parâmetro solo é um parâmetro que tem importância fundamental na adaptação dessa metodologia ao carste tropical, sendo a camada que promove a proteção dos aquíferos cársticos a potencial contaminação advinda de atividades antrópicas. É neste parâmetro que grande parte das reações de atenuação natural ocorrem na zona vadosa e onde a gênese, mineralogia, infiltração dos potenciais contaminantes e parâmetros físico-químicos diferem dos solos europeus. A atenuação natural ocorre também na zona saturada, porém nessa fase, a contaminação já chegou ao aquífero e como se sabe, a descontaminação de aquíferos é muitas vezes dispendiosa e longa e, muitas vezes pela complexidade dos aquíferos, principalmente o cárstico, pode ser inviável. Além disso, o método COP é aplicado somente na zona vadosa.

Solos mediterrâneos são solos formados sob o clima mediterrâneo e são chamados de *Terra Rossa*, quando advindos de rochas calcárias (Foto 3.1) e Solos Vermelhos Mediterrâneos quando advindos de outra fonte parental (ex.: na África do Sul e Austrália são observados arenitos, argilitos e xistos). O clima mediterrâneo é composto de duas estações bem marcadas, uma chuvosa onde predomina baixas temperaturas - inverno, e outra seca com altas temperaturas – verão. Os Solos Mediterrâneos cobrem aproximadamente 420 milhões de hectares e englobam também pequenas áreas na Califórnia, oeste da Província do Cabo na África do Sul e oeste e sul da Austrália (VERHEYE, 2005).

Foto 3.1 - Solo Terra Rossa.



Fonte: VERHEYE, (2005).

A água subterrânea advinda de aquíferos cársticos da Europa é uma fonte importante para abastecimento populacional sendo que os terrenos carbonáticos perfazem 35% da superfície do terreno europeu e o abastecimento de água potável proveniente desse aquífero, em alguns países, representa 50% (COST 65, 1995).

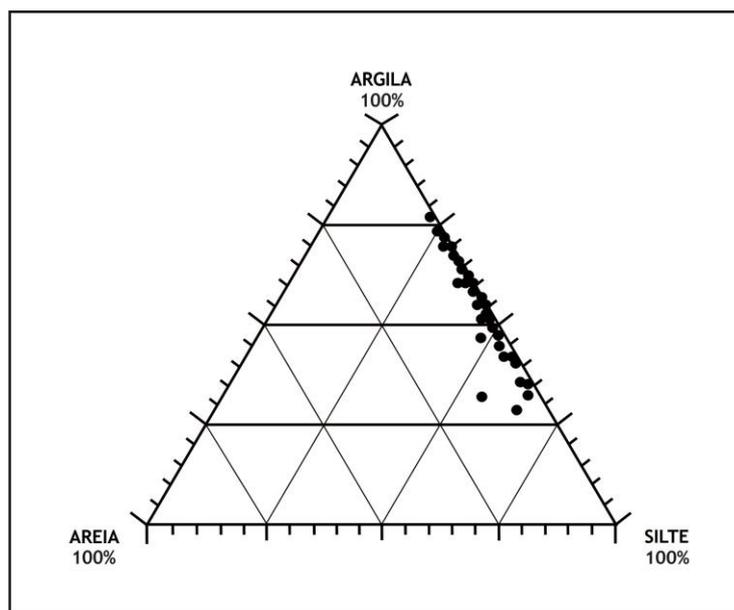
Ao mesmo tempo, os aquíferos cársticos são bastante vulneráveis, particularmente à contaminação, e um dos parâmetros apontados para essa vulnerabilidade é a sua pequena espessura, que na região do sul da Espanha é

centimétrica. Experimentos realizados na Eslovênia (RAVBAR, 2009) demonstraram que a cobertura pedológica mais espessa é encontrada no fundo de dolinas, enquanto que no resto da área são afloramentos de calcário. Outro estudo realizado em área cárstica na Suíça (PERRIN, 2004) mostrou uma área onde a zona vadosa possui 5,0m de espessura oriunda de depósito glacial, ou seja, de alta permeabilidade. Estudo realizado no sul da Itália (POLEMIO, 2009), mostrou uma área onde na porção mais alta a espessura do solo mede menos de 0,5m e caminhando em direção ao litoral essa espessura diminui. Na APA Carste de Lagoa Santa a espessura do solo é muito superior a encontrada em países europeus, chegando a dezenas de metros.

Segundo Zwalen (2004), a camada de solo mais superficial (*top soil*) composta pelos horizontes A e B, não é muito importante para a vulnerabilidade íntinseca à contaminação, no caso do carste europeu, o que não é necessariamente aplicado ao carste tropical.

Os solos cársticos mediterrâneos, texturalmente, possuem argila e silte em quantidades apreciáveis (Figura 3.1) enquanto que, mineralogicamente, são encontrados predominantemente argilominerais de estrutura 2:1 como, por exemplo, ilita, em solos vermelhos mediterrâneos (COSTA, 2004). Em Istria, situada na Península do Mar Adriático, entre os golfos de Trieste, os Alpes Dinárticos e o Golfo de Camaro na divisa entre Croácia, Eslovênia e Itália, o solo é composto predominantemente por argila e silte. O teor de argila nessa região varia entre 32,1 a 77,2% e os argilominerais mais abundantes são a ilita e a caulinita. Apesar de em partes como Grécia (Epirius) serem encontrados vermiculita $((MgFe,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O)$ e caulinita $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$, na Itália (Apulia) é encontrado caulinita e ilita $((K,H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10})$ e na Sardenha são encontrados caulinita e ilita. Na Espanha, já são encontrados os argilominerais caulinita, ilita, vermiculita e montmorilonita $((Mg, Ca)O \cdot Al_2O_3Si_5O_{10} \cdot nH_2O)$. Na Turquia, mais precisamente na península de Karbum na província de Izmir, são encontrados esmectita, caulinita e no noroeste de Marrocos a caulinita (DURN, 2003). A Figura 3.1 mostra a distribuição granulométrica desses solos.

Figura 3.1 - Análise do tamanho de partículas de Terra Rossa.



Fonte: DURN, (2003).

Os solos mediterrâneos de terrenos cársticos são menos intemperizados que os solos tropicais, apresentam perfil moderadamente profundo ($\geq 1,0$ m) com eluviação da argila, mais dissolução e lixiviação de carbonatos e, complexo coloidal completamente saturado por cátions bivalentes. Uma caracterização analítica realizada em solos provenientes de rochas calcárias no Líbano mostrou que a cor predominante na *Terra Rossa* é 2.5 YR 3/6, porcentagem de Fe_2O_3 (14.7), total descalcificação ($\text{CaCO}_3 = 0$), pH em H_2O essencialmente básico (8,0 – 8,6) nos horizontes A e B e levemente ácido a neutro (6,7 – 6,9) no horizonte C, textura fina (geralmente dominada por argilominerais expansivos) e, baixo teor de carbono orgânico apesar de apresentar cor escura ao longo do perfil (UNESCO-EOLSS, 2005).

Os Solos Vermelhos Mediterrâneos apresentam um horizonte B textural com uma profunda cor vermelha e relativamente baixa saturação de bases, são mais espessos, possuem pH ácido nas camadas mais superficiais que aumenta com a profundidade, baixa CTC e baixa quantidade de minerais intemperizados.

Já nos trópicos, pode-se elencar o Latossolo como a classe mais representativa dos solos tropicais. Etimologicamente, o termo “Latossol” deriva de “*laterite*” e “*solum*”, ambos de origem latina significando, respectivamente, tijolo ou conotando material altamente intemperizado (KER, 1997).

Uma característica geral da classe de Latossolos tropicais e subtropicais é que todos possuem textura argilosa a muito argilosa e possuem horizonte B textural espesso.

O argilomineral mais representativo é a caulinita, possuindo, em geral, menores quantidades de hematita (Fe_2O_3), goethita (FeOOH) e gibbsita $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Segundo Santos *et al.*, (2018), o Horizonte B Latossólico é caracterizado como um horizonte mineral subsuperficial, cujos constituintes evidenciam avançado estágio de intemperização, explicitada pela alteração quase completa dos minerais primários menos resistentes ao intemperismo e/ou de minerais de argila 2:1, seguida de intensa dessilicificação, lixiviação de bases e concentração residual de sesquióxidos, argila do tipo 1:1 e minerais primários resistentes ao intemperismo. Em geral, é constituído de óxidos de ferro e de alumínio, minerais de argila 1:1, quartzo e outros minerais mais resistentes ao intemperismo, podendo haver predominância de quaisquer desses materiais. Em geral, apresentam relação silte/argila inferior a 0,7 nos solos de textura média e inferior a 0,6 nos solos de textura argilosa a muito argilosa além de espessura mínima de 0,50 m. Diferenças nas propriedades encontradas em argilominerais 1:1 e 2:1 são importantes nos processos de atenuação de potenciais contaminantes, por exemplo, na retenção de contaminantes catiônicos.

3.1.2. Classes Representativas dos Solos Tropicais Brasileiros

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS, 2018) possui 6 (seis) níveis categóricos e leva em consideração características genéticas, químicas e físicas de cada solo até os dois primeiros metros de espessura. De acordo com Azevedo (2018), os três primeiros níveis, que são mais aplicados à maioria dos trabalhos, são precedidos pelos níveis subsequentes aplicados a trabalhos onde se requer detalhamentos mais refinados. Sendo assim, é apresentado a seguir, segundo Santos *et al.*, (2018), as características dos tipos de solos encontrados em regiões tropicais brasileira.

Latossolo

Do *latim lat*, tijolo, conotativo de solos muito intemperizados, que apresentam Horizonte B latossólico. Compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnósticos superficiais, exceto hístico. São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos como resultado de energéticas transformações no material constitutivo. Os solos são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo e têm CTC da fração argila baixa,

inferior a $17 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ de argila sem correção para carbono, comportando variações desde solos predominantemente cauliníticos.

Variam de fortemente a bem drenados, embora ocorram solos que têm cores pálidas, de drenagem moderada ou até imperfeitamente drenada, o que é indicativo de formação em condições atuais ou pretéritas com um certo grau de gleização.

São normalmente muito profundos, sendo a espessura do *solum* raramente menor que 1,0 m. Têm sequência de horizontes com pouca diferenciação de sub-horizontes e transições usualmente difusas ou graduais. O horizonte B tem cores vivas, variando desde amarelas ou mesmo bruno-acinzentadas até vermelho-escuro-acinzentadas, nos matizes 2,5 YR a 10YR, dependendo da natureza, forma e quantidade dos constituintes minerais, sobretudo os óxidos e hidróxidos de ferro, segundo condicionamento de regime hídrico e drenagem do solo, dos teores de ferro do material de origem e se a hematita é herdada ou não.

De um modo geral, os teores da fração argila no *solum* aumentam gradativamente com a profundidade ou permanecem constantes ao longo do perfil.

São em geral, solos fortemente ácidos, com baixa saturação por bases, distróficos ou alumínicos. Ocorrem, todavia, solos com saturação por bases média e até mesmo alta. Esses últimos são encontrados geralmente em zonas (semiáridas ou não) que apresentam estação seca pronunciada, ou ainda que apresentam influência de rochas básicas ou calcárias.

Esses solos são típicos das regiões tropicais e equatoriais, ocorrendo também em zonas subtropicais, distribuídos, sobretudo, por amplas e antigas superfícies de erosão, pedimentos ou terraços fluviais antigos, normalmente em relevo plano ou suave ondulado, embora possam ocorrer em áreas mais acidentadas, inclusive em relevo montanhoso. São originados das mais diversas espécies de rochas e sedimentos sob condições de clima e tipos de vegetação dos mais diversos.

Argissolo

Do *latim argilla*, conotativo de solos onde se acumula argila. Compreendem solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural (horizonte mineral subsuperficial com textura francoarenosa ou mais fina, em que houve incremento de argila) com argila de atividade baixa, ou atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico. Grande parte dos solos desta classe apresenta evidente incremento no

teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B. Os Argissolos são de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas e mais raramente brumadas ou acinzentadas. Apresenta horizonte B com textura muito argilosa e são de forte a moderadamente ácidos com saturação por bases alta ou baixa, predominantemente cauliniticos.

Cambissolo

Do *latim cambiare*, “trocar”, “mudar”, conotativo de solos em formação (transformação). Compreendem solos constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente, isto é, trata-se de um horizonte subsuperficial que sofreu alteração física e química em grau não muito avançado, porém suficiente para o desenvolvimento de cor ou de unidades estruturais, e no qual mais da metade do volume de todos os subhorizontes não deve consistir em estrutura original da rocha. Ocorre subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que não satisfaçam requisitos de outros solos. Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características destes solos variam muito de um local para outro. Logo, a classe comporta desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelado até vermelho-escuro, de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração de argila.

Alguns solos desta classe possuem características morfológicas similares às dos solos da classe dos Latossolos, mas se distinguem destes por apresentarem, no horizonte B, uma ou mais das características abaixo especificadas, não compatíveis com solos muito evoluídos:

- CTC, sem correção para carbono, $\geq 17 \text{ cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ de argila; e/ou
- 4% ou mais de minerais primários alteráveis ou 6% ou mais de muscovita, determinados na fração areia, porém referidos à TFSA (Terra Fina Seca ao Ar); e/ou
- relação molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ determinada na ou correspondendo à fração argila $> 2,2$; e/ou
- 5% ou mais do volume do solo com estrutura da rocha original, como estratificações finas, saprólito ou fragmentos de rocha semi ou não intemperizada.

Gleissolo

Do russo *gley*, “massa do solo pastosa”, conotativo de excesso de água. Compreendem solos minerais, hidromórficos, que apresentam horizonte glei dentro de

0,50 m a partir da superfície ou à profundidade maior que 0,50 m e menor ou igual a 1,50 m, desde que imediatamente abaixo do horizonte A ou E ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Não apresentam exclusivamente textura arenosa em todos os horizontes dentro dos primeiros 1,50 m a partir da superfície do solo.

Os solos desta classe se encontram permanentemente ou periodicamente saturados por água, salvo se artificialmente drenados. A água permanece estagnada internamente ou a saturação ocorre por fluxo lateral do solo. Em qualquer circunstância, a água do solo pode se elevar por ascensão capilar, atingindo a superfície. São solos mal a muito mal drenados em condições naturais, com espessuras normalmente entre 0,1 a 0,5 m e teores de médios a altos de carbono orgânico. São solos que ocasionalmente podem ter textura arenosa (areia ou areia franca) somente nos horizontes superficiais, desde que seguidos de horizonte glei de textura francoarenosa ou mais fina.

São solos formados principalmente a partir de sedimentos, estratificados ou não, e sujeitos a constante ou periódico excesso de água, o que pode ocorrer em diversas situações. Comumente, desenvolvem-se em sedimentos recentes nas proximidades dos cursos d'água em materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfia, podendo se formar também em áreas de relevo plano de terraços fluviais, lacustres ou marinhos, como também em materiais residuais em áreas abaciadas e depressões. São eventualmente formados em áreas inclinadas sob influência do afloramento de água subterrânea (surgentes). São solos que ocorrem sob vegetação hidrófila ou higrófila herbácea, arbustiva ou arborea.

3.1.3. Carbono Orgânico – CO/foc

O solo é uma complexa mistura de compostos minerais e matéria orgânica e, conseqüentemente, essa composição pode variar de solo para solo (Figura 3.2). Matéria orgânica do solo é diferente de fração de carbono orgânico (carbono orgânico). A terminologia f_{oc} é também utilizada para denominar a fração de carbono orgânico presente na matéria orgânica. A matéria orgânica engloba a porção do solo onde ocorre a decomposição de plantas, microorganismos e restos de animais. Dentre os vários processos de decomposição da matéria orgânica, os mais simples (ex.: decomposição da lignina ou celulose) são os responsáveis pelo carbono orgânico presente na matéria orgânica (TOSCANO, 2007).

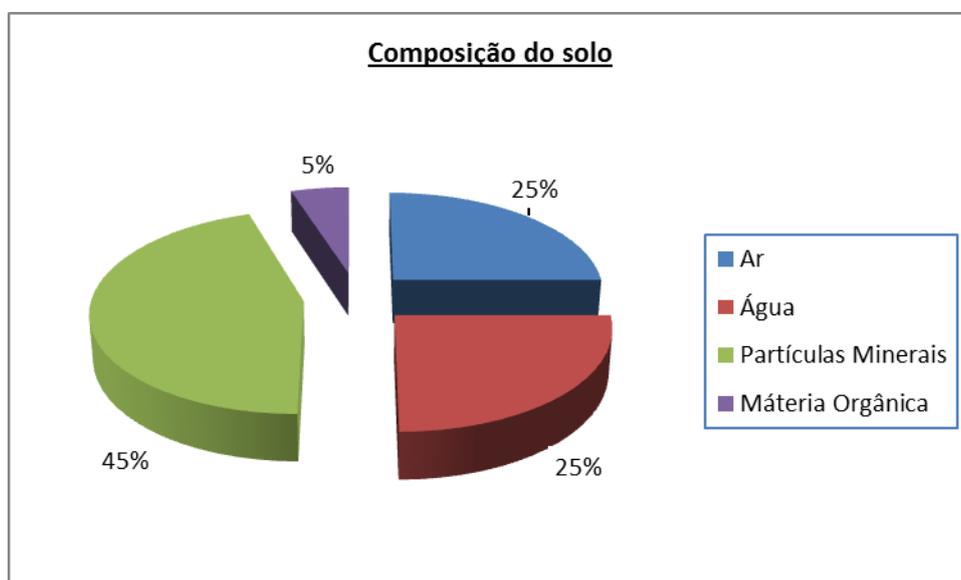
Além de servir como fonte de carbono orgânico e de nutrientes para as plantas, a matéria orgânica é o principal componente responsável pela sorção de íons e de compostos orgânicos e inorgânicos por meio de interações eletrostáticas, pontes de H, forças de van der Waals e interações hidrofóbicas (MELO e ALLEONI, (2009)).

Conforme Lindsay (1979), o solo é composto de um sistema multifásico constituído por sólido (~50%), líquido (~25%) e gás (~25%). A solução do solo é o meio onde as plantas absorvem nutrientes, os íons da solução são tamponados - adsorvidos na superfície do solo e fixados por sítios de troca. A remoção de íons da solução do solo causa desorção parcial de íons similares oriundos do complexo de troca. Os solos são compostos por inúmeros minerais, alguns cristalinos e outros amorfos. Estes minerais impõem limites na composição química da solução do solo. Se a solução fica supersaturada por algum mineral, este pode precipitar; se fica insaturada por algum mineral, este pode ser dissolvido até que o equilíbrio seja atingido.

Quando a água de chuva infiltra, a solução do solo é diluída e, o excesso de água é drenado ao longo do perfil de solo carreando sais e outros potenciais contaminantes dissolvidos (LINDSAY, 1979).

Matéria orgânica e microorganismos podem afetar as relações de equilíbrio no solo. Organismos vivos removem constituintes da solução do solo e incorporam em seus tecidos corporais.

Figura 3.2 - Partes que compõem um solo.



Fonte: <https://www.prescriptionsoilanalysis.com/>.

O carbono orgânico presente na matéria orgânica é de extrema importância na atenuação natural de potenciais contaminantes em subsuperfície. Dentre todos os processos de sorção, a matéria orgânica desempenha um papel importante nos processos de atenuação natural de potenciais contaminantes, haja vista que ela é responsável por reter parte de contaminantes pelo fenômeno de sorção. O fenômeno de sorção está diretamente relacionado na acumulação de íons ou moléculas na interface sólido-líquido. Em geral, 58% da matéria orgânica é carbono orgânico (*Indiana Department of Environmental Management, 2007*). O conteúdo de matéria orgânica diminui com a profundidade do solo (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Relação da matéria orgânica com a profundidade de solo.



Fonte: ALVAREZ, (2006).

Segundo Giuffrè e Conti (2014) a matéria orgânica do solo determina grande parte da natureza e propriedades do solo. Como exemplo, podemos citar:

- favorece a agregação e estruturação do solo;
- aumenta a retenção hídrica e tende a equilibrar a porosidade e a aeração do solo;
- em solos argilosos tendem a aumentar os mesoporos e em solos arenosos os microporos;
- aumenta a CTC; dentre outras. .

O carbono orgânico adere na superfície dos grãos sólidos formando uma espécie de “filme” onde os contaminantes considerados hidrofóbicos ficam aderidos na fase

sólida do meio em que ele está presente. Contaminantes hidrofóbicos são aqueles contaminantes que possuem afinidade de se particionarem preferencialmente para o meio sólido. Nem todo tipo de solo adsorve contaminante, somente aqueles que possuem matéria orgânica presente na superfície dos grãos.

Melo e Alleoni (2009) esclarecem que:

A interação de compostos orgânicos de origem antropogênica, tais como pesticidas, adubos e fertilizantes, com a matéria orgânica do solo pode levar tanto à sua imobilização como ao seu transporte ao longo do perfil e encostas. Quando a ligação ocorre com estruturas micelares ou poliméricas da matéria orgânica do solo, o composto orgânico é imobilizado, seja por aprisionamento, seja por uma ligação química forte. Dependendo do produto, essa associação pode ter um efeito descontaminante, imobilizando ou facilitando a degradação do composto ou seus subprodutos. (MELO e ALLEONI, 2009, p. 25, 26).

Sabendo-se que a zona vadosa é composta por meio sólido, ar e água, considerou-se importante, para o desenvolvimento do estudo de vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos cársticos, em especial o aquífero cárstico da área estudada e que possui espessura de solo de dezenas de metros, levar em consideração o papel da atenuação natural para modificação do método proposto nesse estudo. No carste europeu, a matéria orgânica é pouco expressiva devida à fina camada de solo que recobre o epicarste e, muitas vezes quando existente, está preenchendo os lapíais (ZWALEN, 2004).

3.1.4. pH

O aumento do pH da solução do solo causa elevação da carga negativa, por meio da deprotonação dos sítios de troca de minerais da fração argila, que apresentam carga variável (hematita (Fe_2O_3), goethita (FeOOH), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e dos grupos funcionais carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica (MELO e ALLEONI, 2009).

O pH do solo influencia os processos de troca iônica e sorção/desorção, resultando na menor ou maior retenção de potenciais contaminantes. Para soluções ácidas, a concentração do íon H^+ é favorecida, o que bloqueia a substituição por outros cátions e, como resultado, tem-se uma menor CTC (ALMEIDA, 2009).

Um importante parâmetro que está diretamente associado ao pH e que regula a atenuação de potenciais contaminantes iônicos no solo diz respeito ao PCZ – Ponto de Carga Zero.

O PCZ corresponde a um valor de pH no qual a carga líquida resultante de todas as fontes da superfície de um coloide se reduz à zero e é um importante atributo no que se refere à sorção de íons no solo. Quando o pH supera o valor de PCZ, há o predomínio de cargas negativas no solo. Conseqüentemente, potenciais contaminantes aniônicos não serão retidos (MELO e ALLEONI, 2009).

3.1.5. Capacidade de Troca Catiônica – CTC

A Capacidade de Troca Catiônica-CTC é um parâmetro do solo muito importante no estudo de atenuação de potenciais contaminantes.

De acordo com Raij (1969), a CTC indica a quantidade de íons positivos que um solo é capaz de reter em determinadas condições e permutar por quantidades estequiométricas equivalentes de outros íons do mesmo sinal e, em certos casos, é possível até determinar qual tipo de mineral predomina na fração de argila da amostra.

Em solos de pH alcalino, os cátions Ca^{2+} , Mg^{+2} , Na^+ e K^+ dominam as trocas catiônicas. Em geral, a CTC de um solo se refere à máxima carga negativa da superfície e indica o potencial de capacidade de troca catiônica do solo e é expressa em $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$. Esse potencial de um solo indica a carga superficial proveniente de superfícies de cargas constantes e superfícies de grupos inorgânicos e orgânicos funcionais (ESSINGTON, 2005).

Nos solos de carga variável, a matéria orgânica é um componente importante por contribuir com cargas negativas em quantidade superior às disponibilizadas pela caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e pelos óxidos de Fe e de Al. Como estes componentes, a matéria orgânica tem sua carga dependente das condições do meio, principalmente do pH (MELO e ALLEONI, 2009).

A CTC é diretamente proporcional à matéria orgânica e à quantidade de argila presente no solo. Em geral, quanto maior a matéria orgânica maior é a CTC, especialmente quando a matéria orgânica presente no solo é maior que 2%. Quando esse valor é menor há uma grande variabilidade da CTC e essa correlação se torna aparentemente inexistente. A CTC é diretamente proporcional à quantidade de argila quando a quantidade de matéria orgânica é baixa (<2%) (ESSINGTON, 2005).

O pH também é um importante parâmetro que afeta a CTC (Tabela 3.1). A capacidade de troca aumenta com a elevação do pH do solo.

Tabela 3.1 - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7 e sua dependência com o pH

Minerais de Argila	CTC (meq /100)	Dependência do pH
Caulinita	3-15	Alta
Ilita e Clorita	10-40	Baixa
Esmectita e Montmorilonita	80-150	Não existente
Vermiculita	100-150	Negligenciável

Fonte: MERCKEL e PLANER-FRIEDRICH, (2008).

As análises realizadas por laboratórios brasileiros, emitem o resultado das análises de CTC em mmol/dm^3 , o que é particularmente incongruente com o resto do mundo.

3.1.6. Óxidos

Segundo Fassbender (1994), os óxidos e hidróxidos são resultado dos processos de intemperização do solo, especialmente daqueles solos em estágio mais avançado de desenvolvimento. A divisão de óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos não é bem definida. A descrição apresentada a seguir basea-se em FASSBENDER (1994).

Óxidos de alumínio

Os processos de decomposição dos silicatos por meio do intemperismo leva, primeiramente, à precipitação do alumínio na forma de gibbsita devido à grande insolubilidade desta.

A gibbsita é um mineral que a 25°C apresenta uma solubilidade de $1,9 \times 10^{-33}$, forma comum nos solos, alcançando até 30% de alguns Latossolos.

O hidróxido de alumínio é um poderoso adsorvente de ânions, os quais se unem através de forças de distintas variações. O fosfato é o mais retido seguido do sulfato.

Os óxidos de alumínio também contribuem com a estabilização dos agregados do solo. Supõe-se que, neste aspecto, são importantes suas interações com a matéria orgânica.

Óxidos de ferro

Nos processos de intemperismo dos minerais primários tais como biotita, piroxênios e olivinas há a liberação de ferro, o qual comumente se oxida a Fe (III).

Os óxidos de ferro se apresentam de forma bem distribuída, contribuindo de forma decisiva na cor dos solos. Também se apresentam de maneira acumulada, como concreções ferríferas ou misturados com outros cátions como, por exemplo, de Mn. Estes óxidos têm uma considerável influência sobre as propriedades químicas e físicas dos solos que apresentam proporções altas desse constituinte. Os óxidos de ferro são sítios de adsorção que devem ser levados em conta por ânions e cátions.

Uma forma muito comum dos óxidos de ferro é a goethita (FeOOH), que cristaliza na forma de agulhas e dá ao solo cor pardoamarelada. Uma variedade altamente hidratada é a limonita, dando aos solos a cor amarelada. A goethita (FeOOH) é muito difundida, mas é um importante componente dos Latossolos. Encontra-se em todas as condições climáticas e se forma na precipitação do Fe (III), nas soluções ou ao se oxidar Fe (II), este especialmente em presença de carbonatos.

A segunda forma mais comum dos óxidos de ferro é a hematita, formada por cristais laminares de cor vermelho sangue. Encontra-se frequentemente em solos bem desenvolvidos e em condições relativamente secas. Naquelas regiões onde se encontram tanto goethita (FeOOH) quanto hematita (Fe₂O₃.nH₂O), a presença da última se dá em partes mais secas.

A ferridrita se forma em solos quando o ferro se oxida e precipita em presença de altos níveis de matéria orgânica. É comum que se transforme em outros óxidos de acordo com o ambiente do solo.

A lepidocrosita (gFeO.OH) se forma em solos hidromórficos fortemente intemperizados, em climas tropical e subtropical, particularmente originárias de rochas ígneas básicas.

A magnetita (Fe₃O₄) é um produto residual que às vezes se encontra nos solos, como resultado do intemperismo. Dada sua grande estabilidade, este mineral pode acumular em quantidades apreciáveis em solos fortemente intemperizados.

Em geral, os óxidos de ferro têm baixas capacidades de troca, e suas cargas dependem do pH do meio. Não obstante, são poderosos adsorbentes de ânions e cátions.

Óxidos de titânio

A intemperização de silicatos que contêm Ti, como os anfibólios, liberam Ti que comumente se precipita como TiO_2 . A Anatasa (que representa a forma secundária do óxido de Ti) se forma pela sua síntese no solo e o Rutilo é uma forma residual.

Devido à alta resistência ao intemperismo do Rutilo (TiO_2) e da ilmenita ($FeTiO_2$), estes se acumulam em solos fortemente intemperizados, onde suas concentrações podem alcançar uma proporção muito elevada.

3.2. Processos de interação contaminante-solo

Os processos de adsorção/desorção e dissolução/precipitação são os processos mais importantes que afetam a interação contaminante/solo (SANTOS, *et al.*, 2013).

3.2.1. Sorção/Desorção

Segundo Domenico e Schwartz (1997) interações entre soluto e a superfície dos sólidos representam um importante papel no controle da química da água subterrânea. Em sistemas naturais os equilíbrios de adsorção podem alterar significativamente a química do sistema (solo/água), particularmente no caso de reações de troca iônica. Quando os contaminantes estão sendo transportados, eles podem sofrer retardamento dos seus constituintes ou serem imobilizados.

Esse retardamento ou essa imobilização é função de processos físico-químicos entre os constituintes do solo e o tipo de contaminante e o principal processo é a adsorção.

Existe um termo genérico chamado de sorção que é entendido como uma combinação de reação ou processos não específicos de interação com o meio (água/solo) que compreende a sorção superficial, que é também entendida como adsorção. Sorção é descrita como uma troca de constituintes não específicos contidos na água/solo.

A adsorção é descrita como uma acumulação de átomos ou moléculas de um soluto, gás ou vapor em uma interface (gás-sólido, solução-sólido, solução-gás, líquido-sólido). Essa acumulação pode ocorrer por forças de interações físicas (van der Waals ou *physisorption* = adsorção a qual não envolve a formação de interações químicas), por ligações químicas (Forças de *Coulomb*) ou por interações de hidrogênio

(“*chemisorption*” = adsorção na qual as substâncias adsorvidas são mantidas por interações químicas) (MERCCKEL e PLANER-FRIEDRICH, 2008).

A adsorção é dependente do pH, da natureza do solo (argilas, sais de alumínio, óxidos de ferro e manganês e compostos orgânicos) e dos contaminantes e é o mecanismo mais comum na atenuação de potenciais contaminantes.

Santos *et al.*, (2013) esclarecem que:

“O efeito do pH da solução é extremamente importante quando as espécies a serem adsorvidas são capazes de sofrer ionização no pH prevalecente, o que dificulta o processo de adsorção. A composição mineralógica, teor de matéria orgânica e pH são fatores determinantes na adsorção de metais pelo solo. Logo há variações dessas características em um mesmo solo com a variação da profundidade” (SANTOS *et al.*, 2013, p. 24-29).

A desorção é o processo inverso da adsorção, onde as moléculas se desprendem da superfície do meio sólido. Ambos os processos são dependentes da natureza do solo e dos contaminantes envolvidos.

3.2.2. Substâncias hidrofóbicas e hidrofílicas

Certas substâncias têm mais afinidade em particionar para a água subterrânea (hidrofílicas) ou ficarem adsorvidas no carbono orgânico contido na superfície do meio sólido (hidrofóbicas).

Substâncias hidrofóbicas não apresentam valências ou cargas eletrósticas em sua superfície. Consequentemente, nem moléculas hidratadas com água e nem substâncias dissolvidas podem se ligar a superfície do meio sólido (MERCCKEL e PLANER-FRIEDRICH, 2008).

3.2.3. Dissolução/precipitação

Quando a concentração de uma substância excede o seu grau de solubilidade em uma solução, esse “excedente” sai da solução em forma de precipitado. A Dissolução é o processo inverso da precipitação e ocorre quando a concentração fica abaixo do grau de solubilidade, podendo ocorrer a dissolução da substância precipitada (ALMEIDA, 2009).

Merckel e Planner-Friedrich (2008) descrevem esse processo por meio da lei da ação de massas, como reações reversíveis e heterogêneas onde a dissolução de um mineral AB ($AB \leftrightarrow A + B$) gera uma constante de equilíbrio resultante dessa lei, chamada de constante do produto de solubilidade (K_{ps}). Essa constante é fortemente influenciada pelo tipo de mineral, do solvente, da pressão ou pressão parcial de certos gases (o principal para os processos de carstificação e alargamento das fraturas no epicarste é o CO_2), da temperatura (somente para as reações endotérmicas), pH, E_h e dos íons previamente dissolvidos na água e em que proporção estes já formaram complexos. Estes autores destacam que maior pressão parcial do CO_2 nas camadas superiores do solo, principalmente durante o período de crescimento das plantas e período de altas temperaturas como em países de clima tropical, aumenta consideravelmente a velocidade de dissolução e precipitação. Como as reações de dissolução/precipitação de carbonatos e sulfatos são exotérmicas, esses são pouco influenciáveis pela temperatura.

Já o pH em condições ácidas interfere fortemente na dissolução dos metais tornando-os altamente móveis como cátions livres e em condições básicas precipitam os óxidos e sais e hidróxidos. Já o alumínio é solúvel tanto em meio ácido como alcalino, precipitando como hidróxido ou argilomineral no intervalo de pH entre 5 a 8.

Quanto às condições redox, a solubilidade de elementos que também são dependente do pH, como é o caso do Fe, onde em $pH > 3$ somente podem ser dissolvidas quantidades substanciais da forma reduzida (Fe^{+2}), enquanto o Fe^{+3} rapidamente precipita como hidróxido de Fe mesmo em baixas concentrações em solução (MERCKEL e PLANNER-FRIEDRICH, 2008).

3.3. Potenciais contaminantes no solo

A zona vadosa é de extrema importância no que diz respeito à percolação de contaminantes em subsuperfície. Segundo levantamento realizado na SEMAD-SUPRAM em janeiro e fevereiro de 2016, quanto aos empreendimentos licenciados na área de estudo, é possível intuir vários tipos de potenciais contaminantes que podem atingir a zona vadosa, e, posteriormente o aquífero.

No solo pode ocorrer a presença de compostos aromáticos polinucleares, conhecidos por PAH (*Polyaromatic Hydrocarbons or Polynuclear Aromatic Hydrocarbons*). Alguns desses compostos são carcinogênicos. Alguns desses compostos encontrados no solo incluem fluoranteno, pireno e criseno. Eles podem ser provenientes

de fonte de poluição antrópica ou naturalmente por meio de queimadas (MANAHAN, 2001).

Outros contaminantes orgânicos, tais como BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno) são originalmente de origem antrópica proveniente de combustíveis fósseis (petróleo).

Os poluentes inorgânicos mais tóxicos no solo são os metais pesados, pertencentes aos grupos de transição na tabela periódica. Esses elementos podem ocorrer de forma natural no solo em decorrência do seu material de origem de formação (pedogênese, intemperismo e composição química) e como fontes antropogênicas, dentre as quais se destacam a indústria química e metalúrgica, mineração, pesticidas agrícolas e esgotos domésticos. A mobilidade e a disponibilidade estão relacionadas com os teores solúveis dos elementos mais do que com seus teores totais (ALMEIDA, 2009).

Encontrados naturalmente no solo, os chamados micronutrientes são fundamentais à maioria das plantas e microrganismos e, em excesso, são tóxicos. Entre eles pode-se citar: Cu, Zn, Co, Cr, Se, B, Mo, Ni, As, Cd, Hg, Pb, Pu, Sb, Tl e U.

O pH do solo influencia grandemente a adsorção e mobilidade de metais pesados. O tipo de solo e horizonte influenciam o fator de retardamento de alguns metais pesados tais como: Cu, Pb, Cd e Zn. Para o Cd o fator de retenção no solo é positivamente correlacionado com o pH, matéria orgânica, CTC e superfície específica e é negativamente influenciado para o parâmetro óxidos de ferro. Para o Zn, o fator de retenção no solo é positivamente correlacionado com o pH, CTC e superfície específica. Para o Cu, o fator de retenção no solo é positivamente correlacionado com o pH, soma de bases ou troca por Ca, CTC e matéria orgânica. Para o Pb, o fator de retenção no solo é positivamente correlacionado com o pH, conteúdo de argila e soma de bases ou troca por Ca (MATOS, 2000).

De acordo com Matos (2000), para os tipos de solo que mais representam os solos tropicais, Argissolo e Latossolos, os resultados encontrados na região de Viçosa, Minas Gerais, mostraram que os Argissolos apresentaram maior fator de retardamento para o horizonte A e os Latossolos para o horizonte B, onde os parâmetros químicos se mostraram mais eficientes do que os parâmetros mineralógicos, bem como o pH do solo.

O bário pertence ao grupo dos metais alcalinos terrosos e é encontrado nos minerais barita ($BaSO_4$) e whiterita ($BaCO_3$). Ele está presente em rochas ígneas

(feldspatos e micas) e sedimentares naturalmente como elemento traço, embora não seja encontrado livre na natureza na forma de íon livre devido à sua elevada reatividade (MAGALHÃES *et al.*, 2001; LIMA *et al.*, 2012). A partição do bário e seus compostos no ambiente é afetada pela condição do pH, CTC, presença de sulfato, carbonato, argilominerais e óxidos de metais. O bário na forma Ba^{+2} liberado pelo intemperismo é pouco móvel uma vez que é precipitado na forma de sulfatos e carbonatos (TAVARES, 2013).

Arsênio (As) é um metalóide do grupo VA da tabela periódica e é encontrado como constituinte em mais de 565 minerais. Em solos, as concentrações de As são da ordem de 5 a 10 $mg.kg^{-1}$ (GONÇALVES, 2011). O arsênio é altamente tóxico para animais, plantas e humanos. As principais fontes de contaminação por As são a queima de combustíveis fósseis, fertilizantes orgânicos e inorgânicos e pesticidas. O ânion arsenato ($H_2AsO_4^-$) é a principal espécie trocável no solo, é muito tóxico e sua disponibilidade é controlada por sua sorção nos constituintes do solo (CANTONI, 2010).

3.4. Infiltração

Há diferenças conceituais entre condutividade hidráulica (K) e permeabilidade. A primeira diz respeito à capacidade do solo de infiltrar a água (fluido) e a segunda, às características intrínsecas do meio (textura, porosidade, estrutura, dentre outros), (OLIVEIRA, 2010).

A condutividade hidráulica pode ser determinada em campo ou laboratório e é controlada pelas características do meio, ou seja, pela permeabilidade. Na Figura 3.4 são apresentados intervalos de valores de permeabilidade e condutividade hidráulica para diferentes meios.

A transmissão de água através da zona vadosa pode ser descrita pela Lei de Darcy, (SOILMOISTURE, 2008).

$$q = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} = -K(\psi) \frac{\partial H}{\partial z}, \text{ onde:}$$

$$H = \psi + z;$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = \text{gradiente hidráulico};$$

$$K(\theta) = \text{condutividade hidráulica em função do conteúdo volumétrico de água (L/T)};$$

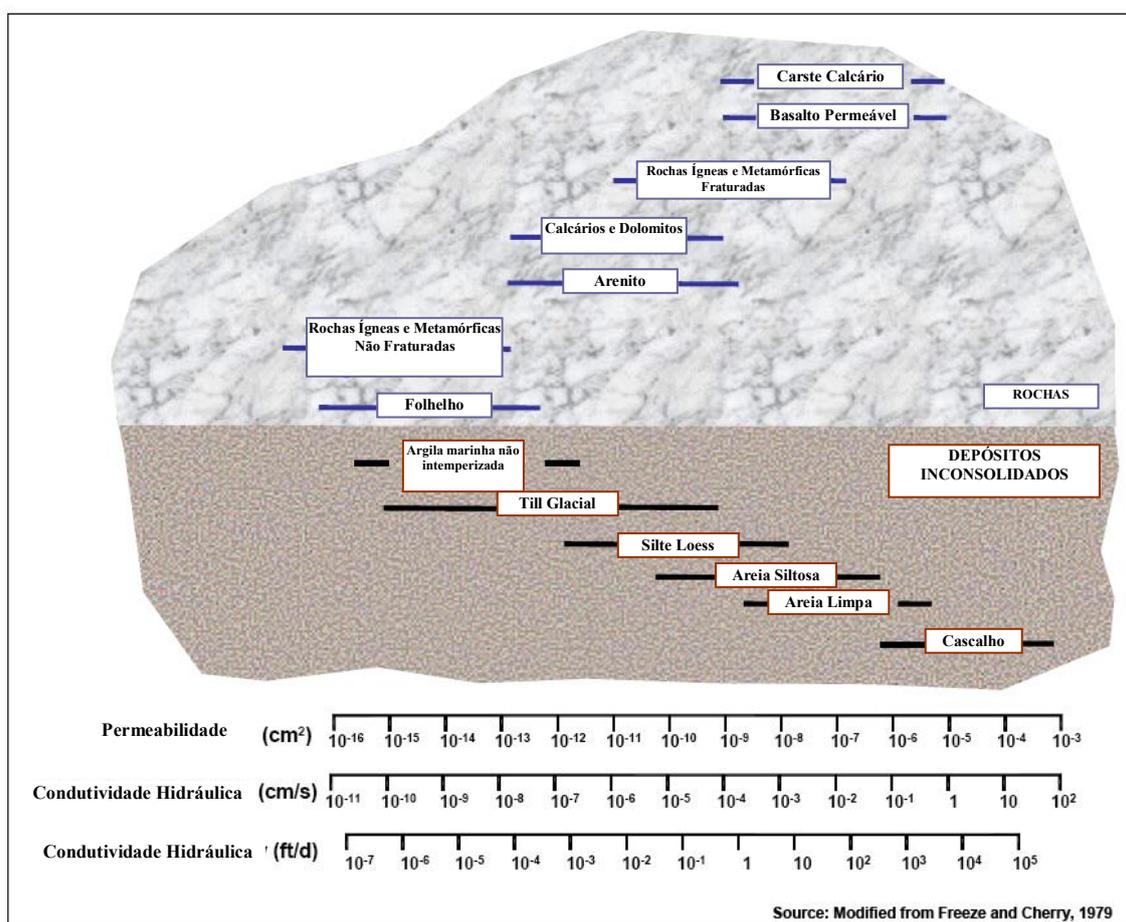
$K(\psi)$ = condutividade hidráulica em função da carga de pressão no poro saturado (L/T);

Ψ = carga de pressão no poro saturado (L);

Z = elevação ou carga gravitacional (L).

Quando o meio poroso está saturado $K(\theta) = K(\psi) = K_{(s)}$. $K_{(s)}$ é altamente relacionado à textura e à estrutura do meio. A Figura 3.4 apresenta os intervalos de permeabilidade e condutividade hidráulica para o meio saturado.

Figura 3.4 - Intervalos de valores para condutividade hidráulica e permeabilidade em meio saturado.



Fonte: Adaptado de API, (2004).

Existem diversos métodos para determinar a condutividade hidráulica em campo. Dentre eles podemos citar: anéis duplos concêntricos, permeâmetro de Guelph, *open end hole*, tensiômetro de mini-disco, etc.

A determinação da condutividade hidráulica entre os diferentes tipos de solos encontrados na área de estudo é de fundamental importância para a análise, em conjunto com as características e propriedades do solo e, o comportamento da atenuação natural

que a camada não saturada promove nos estudos de vulnerabilidade intrínseca à contaminação.

O tempo que leva para um potencial ou real contaminante chegar na zona saturada é de extrema importância nos estudos de vulnerabilidade, o que pode ser estimado pela espessura da camada de solo e pelas propriedades físico químicas desse solo, condutividade hidráulica e condições hidrológicas (recarga), os quais influenciam os fenômenos de atenuação enquanto o soluto é transportado por infiltração.

Sousa *et al.*, (2013) criaram um método simples para estimar esse “tempo de atraso” que é promovido pela zona vadosa, dos reais ou potenciais contaminantes atingirem a zona saturada. Esse método leva em consideração a fração de tempo de trânsito do soluto na zona vadosa (t_r) de acordo com a seguinte equação:

$$t_r = \frac{t_u}{t_u + t_s} \quad \text{onde:} \quad (1)$$

t_u = tempo de trânsito na zona vadosa;

t_s = tempo de trânsito na zona saturada.

Esta equação diz que se a zona vadosa é ignorada e dá o tempo total de trânsito da fonte de contaminação presente na superfície até o receptor (aquífero) somente por t_s , ao invés de $t_s + t_u$. Entretanto, o tempo total de trânsito poderia ser subestimado por t_u ou por t_r em percentagem do tempo total de trânsito.

O termo t_u é diretamente dependente da recarga do aquífero, a qual depende das propriedades do solo e das condições hidrológicas. Dada uma estimativa média da recarga anual R [L /T] e considerando um fluxo vertical na zona vadosa, a média da velocidade de infiltração (v) em um ponto localizado em uma dada elevação z acima do aquífero pode ser estimada pela divisão do Fluxo de Darcy (recarga R , neste caso) pela porosidade do solo. Para o fluxo na zona vadosa, a porosidade pode ser multiplicada pela saturação parcialmente apresentada pelo meio, dada pela seguinte equação:

$$v(z) = \frac{R}{\eta_{ef}(z) \cdot S(z)} \quad \text{onde:} \quad (2)$$

R = recarga do aquífero [L /T];

S = saturação de água [-];

η_{ef} = porosidade efetiva.

Utilizando a equação 2 o tempo de trânsito na zona vadosa pode ser calculado através da equação a seguir.

$$t_u = \int_0^L \frac{1}{v(z)} dz \rightarrow t_u = \int_0^L \frac{\eta_{ef}(z) \cdot S(z)}{R} dz \quad (3)$$

Existem diferentes maneiras de avaliar o termo t_u , as quais diferem exclusivamente do termo $S(z)$. Por exemplo, a estimativa de $S(z)$ foi comparada por Sousa *et al.*, (2013) através de três diferentes métodos: (1) modelamento unidimensional de saturação variável, (2) assumindo que na equação de van Genuchten não tem fluxo e (3) valores tabulados em “*Surface to Aquifer Advection Time*” (SAAT) - técnica de vulnerabilidade da Província de Ontario, Canadá.

3.5. Métodos de vulnerabilidade

Desde que os primeiros conceitos sobre vulnerabilidade de aquífero foram elaborados no final da década de 1960 e início da década de 1970, surgiram vários métodos para proteção da água subterrânea. Dentre eles podemos destacar: DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987), GOD (FOSTER e HIRATA, 1988), AVI (VAN STEMPOORT *et al.*, 1993) e SINTACS (CIVITA, 1994). Contudo, os métodos mais utilizados mundialmente para áreas cársticas são: EPIK (TRIPET *et al.*, 2000), PI (GOLDSCHIEDER *et al.*, 2000) e COP (VÍAS *et al.*, 2006).

Em geral, os aquíferos cársticos são considerados de alta vulnerabilidade e a qualidade de sua água depende basicamente da composição química da rocha e dos fatores climatológicos e estruturais, além das atividades humanas.

Segundo Foster e Hirata (1988), a condição essencial para o desenvolvimento de estratégias, visando a preservação dos recursos hídricos subterrâneos, é o estabelecimento de áreas ou atividades com maior risco de degradação dos aquíferos, a fim de priorizar a aplicação de recursos técnicos e financeiros locais de maior interesse sócioeconômico ambiental.

A determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas deve servir pelo menos para identificar quais os aquíferos, ou parte deles, são mais vulneráveis (frágeis) à contaminação imposta pelas atividades desenvolvidas pelo homem, bem

como quais dessas atividades são responsáveis pelos maiores riscos de contaminação de uma dada área.

Foster e Hirata (1988) lembram que as águas subterrâneas, por se encontrarem total ou parcialmente confinadas, são geralmente mais protegidas da poluição que as águas superficiais, devido à presença de solo atuando como meio filtrante.

No caso de aquíferos cársticos, a zona vadosa é muito mais efetiva no processo de atenuação de poluentes que a zona saturada, devido aos processos microbiológicos e físicoquímicos. Isto ocorre por que o sistema de fissuras das rochas calcárias facilita a rápida penetração dos poluentes no aquífero (FRISTZSONS *et al.*, 2001).

Mapas de vulnerabilidade têm se tornado cada vez mais essenciais nas estratégias de proteção da água subterrânea e são ferramentas valiosas no gerenciamento deste meio (DALY, 2002).

Vulnerabilidade é considerada em três diferentes níveis: vulnerabilidade intrínseca, vulnerabilidade específica e cenário de contaminação (PERRIN, 2004).

De acordo com Daly (2002), a vulnerabilidade intrínseca leva em consideração as características da geologia, hidrologia e hidrogeologia da área de interesse, entretanto, é independente da natureza do contaminante. Já a vulnerabilidade específica é utilizada para definir a vulnerabilidade da água subterrânea a um particular contaminante ou grupo de contaminantes e considera as propriedades do contaminante nos diferentes subsistemas do aquífero cárstico.

O cenário de contaminação é definido pela evolução temporal e a distribuição espacial da função de entrada de um dado contaminante.

No intuito de alcançar alguma consistência no estabelecimento de mapas de vulnerabilidade intrínseca na Europa, uma nova abordagem é proposta pelo Grupo de Trabalho 1 da *European Cooperation in Science and Technology – COST Action 620* (Mapa de vulnerabilidade para a proteção de aquíferos cársticos).

A metodologia proposta é projetada para ser baseada mais nas características físicas do meio do que em técnicas de mapeamento de vulnerabilidade e leva em consideração o meio cárstico específico. São combinados “fatores chaves” para contrapor as camadas e levar em conta a concentração de fluxo para uma relativa proteção da água subterrânea originária da contaminação, enquanto leva em consideração qualquer característica que ignore a proteção das camadas sobrepostas que protege o aquífero (DALY, 2002). Esta metodologia é baseada na definição de

vulnerabilidade intrínseca, ou seja, vulnerabilidade da água subterrânea gerada por atividades humanas.

O fator precipitação é significativo para descrever as características de entrada de água no sistema (recarga).

As metodologias EPIK, PI e COP levam em consideração as características mais aplicáveis a aquíferos cársticos em todo mundo e são metodologias já reconhecidamente mais utilizadas a esse meio.

O método EPIK foi desenvolvido na Suíça para ser aplicado somente na avaliação de vulnerabilidade de aquíferos cársticos (DOERFLIGER *et al.*, 1999). Ele também é altamente utilizado para planejamento do uso do solo, especialmente para proteção de áreas de recarga (VLAICU, 2008).

Segundo Polemio (2008), quatro parâmetros principais são considerados e mapeados: epicarste (E), cobertura protetiva (P), condições de infiltração (I) e desenvolvimento da rede cárstica (K). O parâmetro E considera o efeito em termos de armazenamento de água (durante eventos de chuva ou derretimento de gelo) e a concentração de fluxo vertical através de condutos, isto é, avaliado tomando como base o mapa geomorfológico. O parâmetro P descreve a função protetiva das camadas entre a superfície do terreno e o lençol freático, principalmente solo, subsolo, rochas não cársticas e rochas cársticas não saturadas. O parâmetro I é avaliado por distinção das áreas de concentração de infiltração e áreas as quais a infiltração difusa prevalece, onde a declividade e uso do solo são subfatores-chaves. O parâmetro K representa o grau de desenvolvimento de carstificação no aquífero. A contribuição de cada parâmetro para π (fator de proteção) é conseguido pela multiplicação de cada parâmetro (E,P,I,K) por um fator de peso e depois somadas as quatro contribuições ($\pi = \alpha.E_i + \beta.P_j + \gamma.I_k + \delta.K_l$).

O fator de proteção varia de 9 a 34 e é categorizado em quatro classes. Essas classes estão entre os critérios baixa proteção até alta vulnerabilidade: o fator de proteção 34 indica a máxima proteção bem como mínimo de vulnerabilidade.

De acordo com Goldscheider (2000), o método PI é uma combinação baseada numa abordagem GIS (Sistema de Informação Geográfica) para mapear a vulnerabilidade para todos os quatro tipos de aquíferos, mas em especial para o cárstico.

O fator P descreve a efetividade da camada protetora, resultando principalmente da espessura e condutividade hidráulica para todo estrato entre a superfície do terreno e o lençol freático (solo, subsolo, rochas não cársticas e a zona não saturada das rochas cársticas). O fator P é calculado de acordo com a versão modificada do método GLA e

categorizado em cinco classes. O método GLA (*Geologisches Landesamt*) foi projetado meticulosamente para investigar a camada protetora de regiões cársticas, tentando explicar a relação entre a efetividade dos processos de atenuação natural e o tempo de residência dos contaminantes (VLAICU, 2008). O fator I indica o grau no qual a camada protetora é ignorada como resultado da concentração de fluxo na superfície e próxima à superfície. Se a infiltração ocorrer de modo difusa, sem significativa concentração de fluxo (terrenos planos e superfície altamente permeável), é apropriado o valor 1. Em contrapartida, se a camada protetora for completamente ignorada por infiltração através de dolinas ou sumidouros, o valor apropriado para I passa a ser 0. Se o aquífero cárstico for recarregado através de um rio ou riacho que adentre o sistema através de sumidouro, o valor fica entre 0 e 1 dependendo do grau no qual a camada protetora é ignorada. O mapa de infiltração mostra a distribuição espacial do fator I.

O fator de proteção π é subdividido em 5 classes e é definido como o produto de P e I. Um fator de proteção $\pi \leq 1$ indica um grau muito baixo de proteção e extrema vulnerabilidade à contaminação; $\pi = 5$ indica um grau de proteção alto e baixa vulnerabilidade. A distribuição espacial de π é apresentada em um mapa de vulnerabilidade. Mapas com baixos valores de I e P são impressos como intercalações do mapa de vulnerabilidade final; daí podem ser notadas se a vulnerabilidade de uma área particular é devido à fina camada protetora ou pela concentração do fluxo na superfície ou próximo a esta (GOLDSCHIEDER, 2000).

3.5.1. O método COP

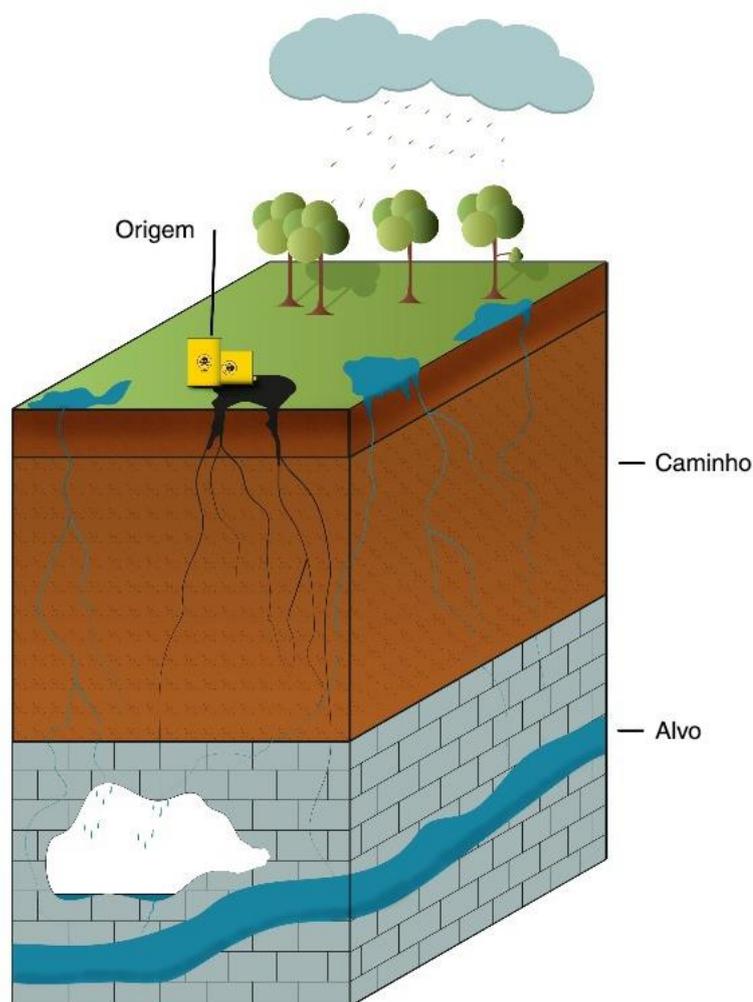
O método COP foi desenvolvido para avaliação da vulnerabilidade intrínseca em aquíferos cársticos em conformidade com a abordagem *COST Action 620*, usando as propriedades das camadas sobrepostas acima da zona saturada (Fator O), a concentração de fluxo (Fator C) e a precipitação (Fator P).

A maior tarefa da *COST 620* foi desenvolver uma abordagem geral (C,O,P,K-fator de carstificação) não preceptiva, para mapear a vulnerabilidade intrínseca à contaminação em áreas cársticas europeias. Como as áreas cársticas europeias abrangem uma vasta área que inclui os Alpes e Terras Baixas Mediterrâneas e Continental e, por conseguinte, há diferenciações também na avaliação do aquífero cárstico advindo dessas variações regionais (dentro do continente europeu) algumas adaptações da abordagem poderiam ser realizadas para sua correta utilização (ZAWLEN, 2004). Surgiram assim

alguns métodos derivados da abordagem *COST 620* para aplicação em diferentes países europeus. Dentre alguns podemos citar: COP (VIAS *et al.*, 2006), PI (GOLDSCHIEDER *et al.*, 2000), VULK, que é um programa analítico de computador que foi desenvolvido no *Hydrogeology Centre of Neuchâtel* (CHYN), LEA (*Localised European Approach*), DUNNE (2003), para ser utilizado na Inglaterra e País de Gales, Time-Input Method e KRALIK (2001), este último desenvolvido para ser utilizado em regiões montanhosas europeias.

A abordagem criada pela *COST 620* não especificou como os componentes dos fatores poderiam ser medidos ou categorizados ou mesmo como os pesos poderiam ser estabelecidos. A abordagem *COST 620* está baseada no modelo conceitual: *origin – pathway – target*, conforme apresentado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Modelo conceitual instituído pela COST Action 620 para proteção da água subterrânea.



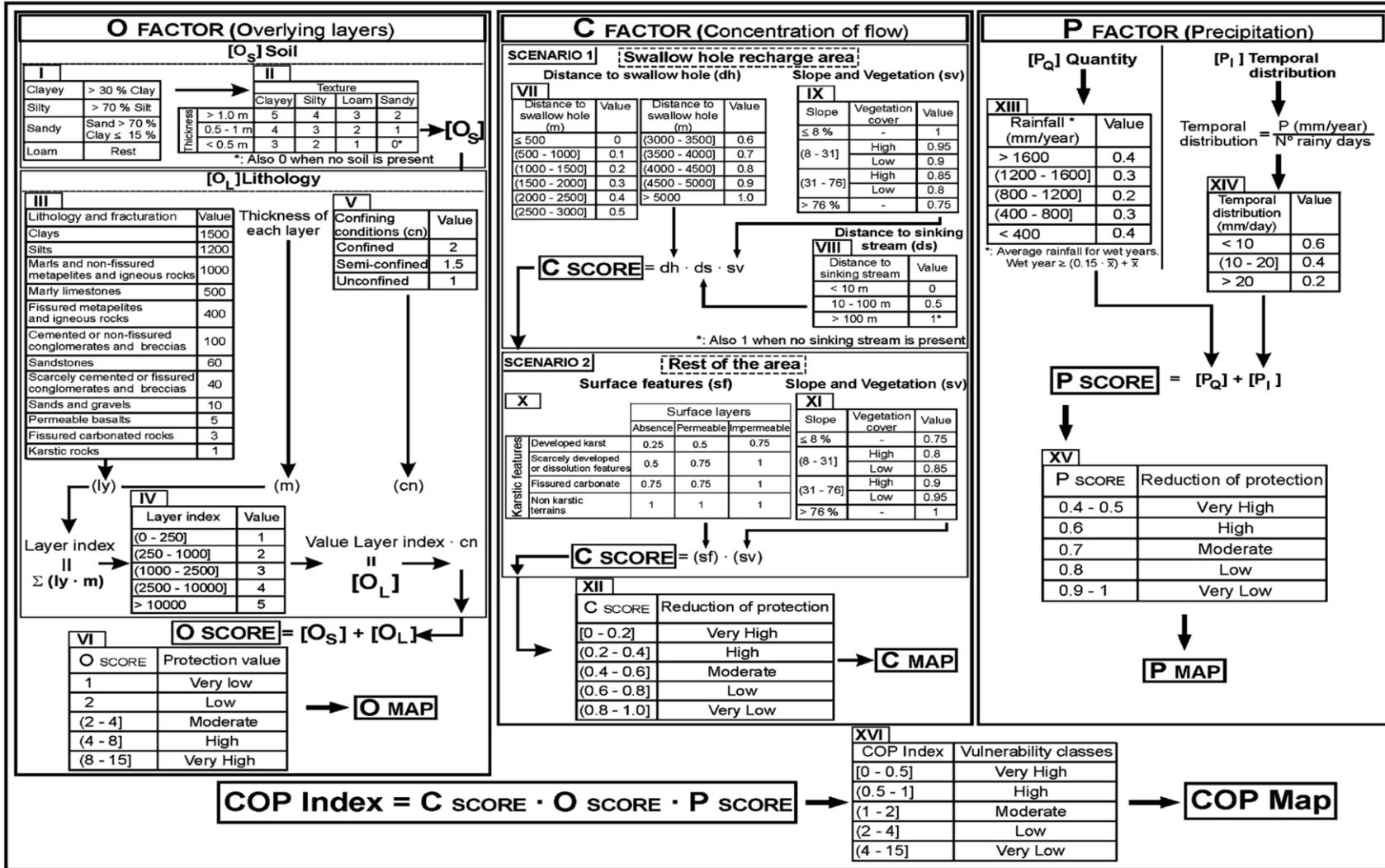
Na Figura 3.5 a origem está associada com a fonte da contaminação e onde o contaminante foi liberado. O caminho é representado pelo deslocamento do contaminante até chegar ao alvo (aquífero) e este, também chamado de receptor, é a água-recurso o qual deve ser protegido. Os conceitos de recurso (água subterrânea) e fonte (poço) são tão próximos que é impossível proteger a fonte sem proteger o recurso.

A Diretiva Europeia de 2000 coloca a água subterrânea como um produto não comerciável, digna de ser protegida com prioridade máxima.

O método COP considera as feições cársticas, tais como a presença de dolinas e sumidouros, onde as mesmas desempenham importante papel na infiltração de potenciais contaminantes em subsuperfície, declividade do terreno e vegetação, reunidos no “Fator C”. O “Fator P” permite considerar através da variabilidade temporal e espacial o transporte de contaminantes para dentro do aquífero (VÍAS *et al.*, 2006). As características de infiltração (concentrada via sumidouro e/ou dolina) diminuem a proteção natural dada pelas camadas que se sobrepõem ao aquífero (Fator O), haja vista que é na infiltração difusa que se dão os processos de atenuação natural por meio das características físico-químicas do solo. O produto dos fatores C, O, P fornece os índices de vulnerabilidade que são agrupados em cinco classes (muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa), com valores que variam entre 0 e 15, com vulnerabilidade crescente nessa ordem. Além disso, a metodologia COP estabelece diretrizes detalhadas, tabelas e fórmulas para avaliação da vulnerabilidade e seleciona as variáveis, parâmetros e fatores a serem utilizados (NOSSA, 2011).

O Quadro 3.1, mostrado a seguir, apresenta o fluxograma de cálculo do método COP.

Quadro 3.1 - Fluxograma para o cálculo do método COP (VIAS et al., 2006).



O “Fator C” é definido para dois tipos de cenários diferentes. O primeiro define a recarga direta ou concentrada via dolina ou sumidouro, atravessando de maneira direta a proteção promovida pela zona vadosa e é dado pelo produto da distância dos pontos de recarga até as áreas de sumidouros (dh) e distância de córregos/riachos vertentes a um sumidouro (ds) com a influência da declividade do terreno (s) e da vegetação (v), como apresentado na equação seguinte:

$$C = s.v.ds \text{ e ou } C = s.v.dh.$$

O segundo cenário define a recarga de maneira difusa e nesse caso o fator C é definido pelo produto das feições superficiais (sf), declividade (s) e vegetação (v), ou seja:

$$C = s.v.sf.$$

O critério para quantificar o “Fator O” está embasado no tipo de rocha e grau de fraturamento (ly), bem como na espessura da camada protetora do aquífero (m) e suas condições de confinamento (cn). O somatório do produto dos subfatores, origina um índice que é associado com a proteção do aquífero, $\sum(ly.m)$. Dessa maneira, o subfator O_L – litologia, é dado pela multiplicação $\sum(ly.m) \times cn$. O parâmetro cn diz respeito às condições de confinamento do aquífero, associando-se o valor 1 para aquíferos não confinados, 1,5 para semi-confinados e 2 para aquíferos confinados. A capacidade de atenuação dos contaminantes aumenta proporcionalmente com o aumento das camadas de proteção. O “Fator O” é obtido pelo somatório dos subfatores O_s – solo e O_L – litologia. A equação apresentada a seguir define o modo como o fator O é obtido.

$$O = O_s + O_L$$

O “Fator P” considera a precipitação média dos anos úmidos, pois é quando o nível piezométrico está mais próximo da superfície topográfica e o aquífero, nesse momento, é mais vulnerável à contaminação.

Este fator é a soma de dois subfatores, P_Q e P_I . O subfator P_Q é calculado através da média anual dos anos considerados úmidos, ou seja, dos anos em que a média das precipitações atingem 15% acima da média anual $(0,15.\bar{x}) + \bar{x}$, e o subfator P_I é calculado utilizando a média de chuva dos anos considerados úmidos dividido pelo número de dias chuvosos.

O índice de vulnerabilidade final, COP, é dado pela multiplicação dos três fatores: C x O x P. A partir dos resultados encontrados a vulnerabilidade da área é mensurada em cinco classes diferentes (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Classes de vulnerabilidade do método COP (VÍAS et al., 2006).

Índice COP	Classes de Vulnerabilidade
0 - 0,5	Muito Alto
0,5 – 1	Alto
1-2	Moderado
2-4	Baixo
4-15	Muito Baixo

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1. Clima

O estado de Minas Gerais é caracterizado por grande diversidade de climas, dos úmidos aos semi-áridos, dos continentais quentes aos climas amenos montanhosos, originados, fundamentalmente, pelo fato de grande parte de seu território apresentar uma topografia bastante acidentada, com altitudes que oscilam de 250 m até valores superiores a 2.700 m. Toda essa diversificação fisiográfica interage com a circulação atmosférica, originando os vários microclimas existentes (MAIA, 1986).

Segundo a classificação de Thornthwaite (1989), a região apresenta clima do tipo B1 r B'4 a', onde: B1 corresponde ao tipo climático primeiro úmido, r indica pouca deficiência de água, B'4 corresponde ao tipo climático quarto mesotérmico, indicador de grande eficiência térmica e a' indica que a concentração da eficiência térmica no verão é inferior a 48% da eficiência térmica anual (SCHIMITH, 2006).

Os parâmetros climatológicos médios característicos da região do carste Lagoa Santa são (CABRAL, 1994):

- temperatura média anual: 22,8°C;
- pressão atmosférica média anual: 929mb;
- umidade relativa média anual: 67,8%;
- velocidade média anual do vento: 1,5 m/s

- direção predominante dos ventos (anual): E, SE.

- precipitação média anual: 1300 mm (6 meses chuvosos (outubro-março) e 6 meses de relativa estiagem (abril-setembro)) com média histórica de 1280,4 mm.

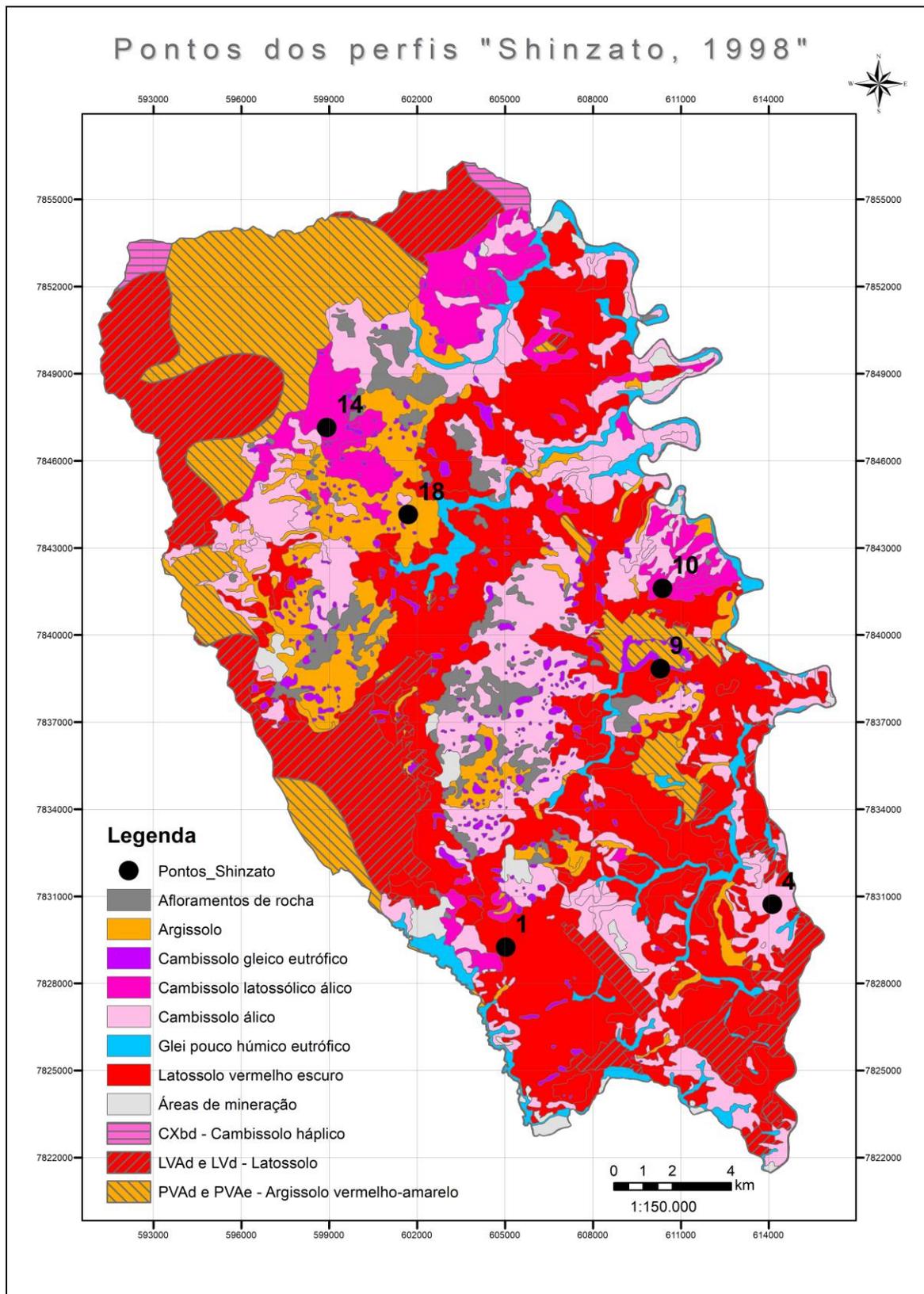
Os dados de precipitação estão detalhados no item 8.4 (cálculo do Fator P do método COP).

4.2. Solo

Os estudos sobre solos no estado de Minas Gerais não atingiram ainda nível satisfatório, apesar de haverem sido utilizadas modernas técnicas de levantamento pedológico em várias regiões. No entanto, as informações disponíveis, relativas às características, distribuição e extensão dos solos são, em parte, insuficientes para elaboração de um mapa de solos preciso do estado (SOUZA, 1983).

Na área de estudo os trabalhos disponíveis também não fogem a essa realidade, haja vista que o estudo que mais contribuiu com dados de solo nessa tese foi realizado por Shinzato (1998). Este foi base para o trabalho apresentado por Viana (1998) o qual compreende o levantamento semidetalhado de solos na área da APA Carste de Lagoa Santa. Shinzato (1998) descreveu 18 perfis de solos os quais abrangeram análises físico-químicas com profundidade média de 1,3 m há oito perfis realizados pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, os quais não é claro se foram realizados por Tannús (1992) ou (1994) e 49 tradagens que foram apresentados por Viana (1998). Destas 49 tradagens, 14 foram realizadas a partir da profundidade final de perfis abertos. Somente seis perfis são identificáveis por apresentarem coordenadas geográficas que se localizam dentro da área de estudo. Um perfil apresentou coordenada fora da área e para as tradagens não foram apresentadas as coordenadas geográficas. Dessa maneira, não se pode aproveitar essas informações, haja vista que seis pontos são insuficientes para se fazer uma análise para a extensão da área estudada. Além disso, estes têm distribuição espacial bastante irregular (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Localização dos perfis de solo realizados por Shinzato (1998).



Fonte: Adaptado de Viana, (1998).

Meneses (2003) descreveu as classes de solos encontradas na área de estudo como sendo Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Gleissolos, as mesmas descritas por Viana (1998) e Tannús (1994). Na área de estudo, os Latossolos cobrem 58,33% da área total, seguido por Cambissolos com 25,01%, Argissolos com 13,33% e Gleissolos com 3,33%.

De acordo com Shinzato (1998), os solos da área de estudo são morfologicamente profundos, porém ele não indica essa profundidade. Sabe-se que as tradagens chegaram à profundidade máxima de 5,0 m, o que não necessariamente é a profundidade final de solo.

Pessoa (2005) analisou 154 furos de sondagens no extremo sul da área de estudo (região Lapa Vermelha) e encontrou argila preenchendo descontinuidades geológicas até à profundidade de 100,0 m. Boulet (1992) realizou estudos nessa mesma área e analisou duas trincheiras num estudo de topossequência em uvala encontrando espessuras de Latossolos de mais de 8,0 m. Análises de furos de sondagem, bem como perfis descritivos de poços, não trazem informações pedológicas apropriadas porque não separam o que é solo e o que é material inconsolidado, descrevendo nos perfis “solo” até 100,0 m de profundidade o que na verdade não é pelo próprio conceito de solo.

Piló (2000) ressalta a importância dessa cobertura de material inconsolidado argiloso no epicarste da área de estudo assumindo papel de destaque, pois esse material encontra-se em contato direto com a rocha solúvel subjacente, influenciando a circulação hídrica interna.

4.3. Geomorfologia

De acordo com Ford e Williams (2007), a terminologia cárstica internacional pode ser muito confusa, por isso foi elaborado um glossário para esta tese.

O conjunto espacial que constitui a geomorfologia cárstica pode ser compartimentado em três domínios, envolvendo a superfície (exocarste), a subsuperfície (epicarste) e o meio subterrâneo (endocarste). Esses domínios se apresentam em lugares onde se encontram estruturas e mecanismos responsáveis pela operação de processos geomorfológicos atuais, assim como lugares que guardam importantes registros de processos do passado. Dois parâmetros se interrelacionam nesse conjunto espacial: morfologias e os materiais constituintes rocha, alterita, solos e depósitos (PILÓ, 2000).

Segundo Kohler *et al.*, (1995) *apud* CPRM (1998), o relevo cárstico, mais do que qualquer outro, desenvolve-se sobre rochas solúveis pela água (calcários), as quais sofrem corrosão através das águas superficiais e subterrâneas. A corrosão e os abatimentos endocársticos, associados aos outros processos morfogenéticos da dinâmica interna e externa, são os principais responsáveis pela dinâmica e evolução dos relevos cársticos.

Não só o alto teor de carbonato de cálcio da rocha calcária e sua estrutura (ou acamamento, fraturamento, etc.), como também o volume de águas e o clima são os principais fatores de corrosão dos relevos cársticos. Ao lado destes processos químicos de corrosão, ocorrem processos físicos de abatimentos de vazios subterrâneos e dos desabamentos de blocos da lapas e paredes (KOHLENER *et al.*, (1995) *apud* CPRM, 1998).

Segundo Berbert-Born *et al.*, 2002, a geomorfologia instalada na região do carste Lagoa Santa reflete uma estratigrafia que é marcada pela sucessão de duas unidades carbonáticas composicionalmente diferenciadas (Formação Sete Lagoas – Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa), superpostas por rochas siliciclásticas muito finas (Formação Serra de Santa Helena), estando tal sequência assentada em discordância sobre rochas do Complexo Gnáissico Migmatítico Arqueano. As coberturas detrito-lateríticas elúvio-coluvionares do Cenozóico que ocorrem como superfícies residuais aos estágios de aplainamento também desempenham papel na estruturação do relevo cárstico aqui descrito (BERBET-BORN *et al.*, 2002).

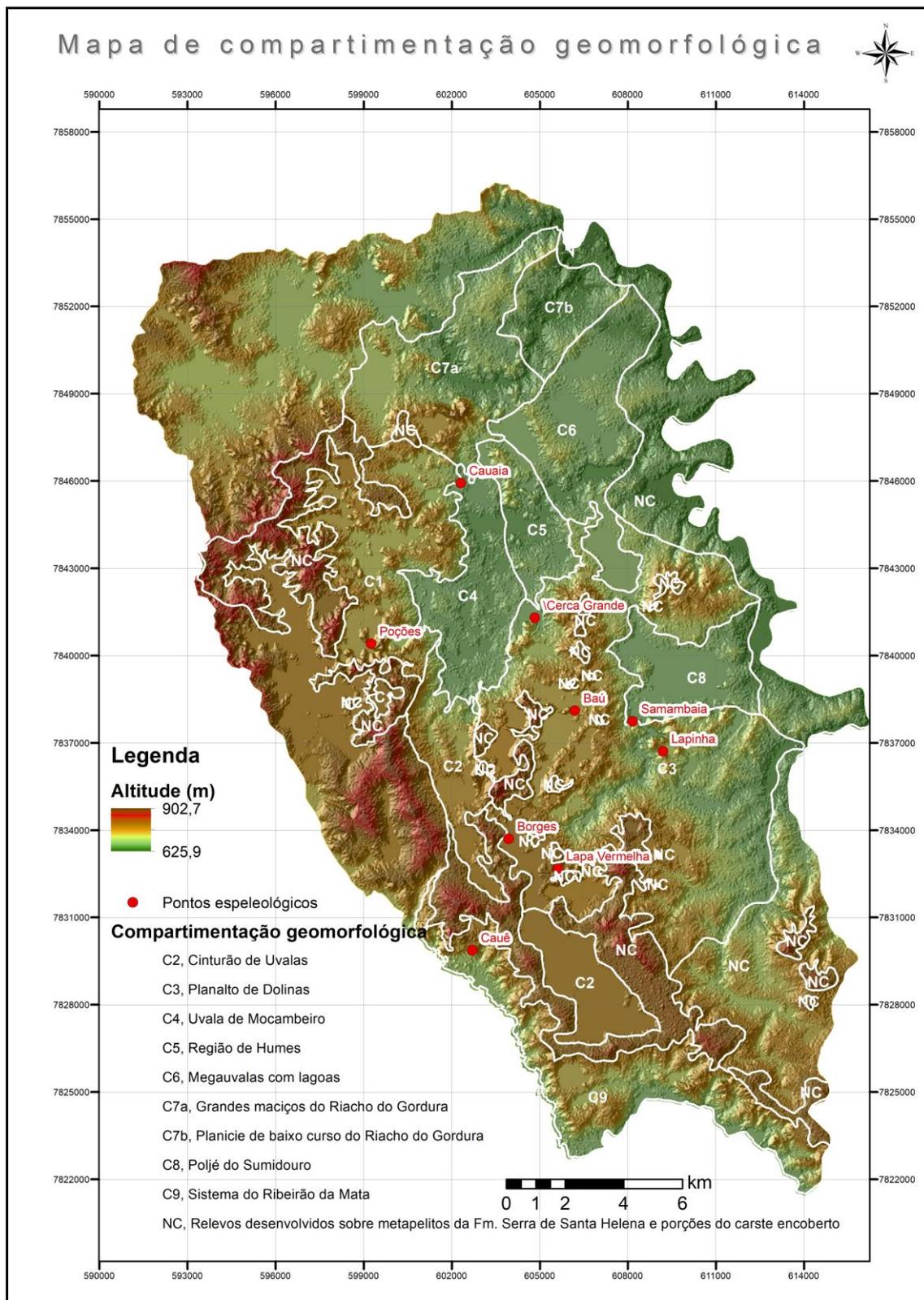
De acordo com Herrmann *et al.*, (1998), a região cárstica estudada apresenta como característica principal inúmeras lagoas, que secam periodicamente em função da oscilação do nível de água subterrâneo do aquífero cárstico. Em função da diversidade das formas, o modelado cárstico pode ser subdividido em quatro compartimentos distintos: desfiladeiros e abismos com altos paredes, cinturão de grandes depressões (uvalas), planalto de pequenas depressões (dolinas) e planícies cársticas ou poliés.

Desfiladeiros e abismos com altos paredes

Segundo Hermann *et al.*, (1998), essas áreas localizam-se nas cotas mais elevadas do calcário, conferindo-lhe a condição de recarga do aquífero cárstico. A partir desse compartimento (850 m), o relevo cai em direção ao Rio das Velhas, nível de base regional (650 m). Na Figura 4.2 é apresentado o mapa hipsométrico da área, onde são verificadas as porções de cotas mais altas e mais baixas com a localização das feições

geomorfológicas descritas. Apresenta-se uma porção coberta por filitos (carste coberto) na Serra dos Ferradores (900 m), já no entorno dos limites da área da região do carste Lagoa Santa. A magnitude e exuberância deste relevo cárstico estão associadas à espessura do pacote de calcário regional e ao espetacular colapso do endocarste em função do longo tempo decorrido com o fluxo permanente das águas endocársticas. Trata-se do compartimento cárstico “chave” para se compreender todo o carste regional. A ocorrência típica desse compartimento fisiográfico é localizada à NE de Matozinhos. Nessa região está localizado o fluviocarste do Mocambo que está encaixado, em parte, no desfiladeiro de Poções, com seus paredões abruptos, que alcançam até 40 m de altura. Representa a área cárstica menos degradada dentro do perímetro da área (HERMANN *et al.*, 1998).

Figura 4.2 – Distribuição de cotas altimétricas na área de estudo com feições geomorfológicas.



Fonte: Adaptado de Hermann *et al.*, (1998).

Cinturão das grandes depressões

Corresponde ao trato do terreno situado entre a Serra dos Ferradores e o planalto de dolinas, estendendo-se além da planície do Mocambeiro até as proximidades da planície fluvial do Rio das Velhas (Fazenda Jaguará) (HERMANN *et al.*, 1998). Refere-se às grandes depressões cársticas (uvalas) de diâmetro acima de 2.000 m, chegando a 4.000 m, formadas pela coalescência de uma ou mais dolinas. Suas principais características são o fundo irregular, o contorno alongado com vertentes suavizadas, recebendo água temporariamente, até um nível de quatro metros. Este compartimento funciona como recarga do aquífero nas cheias (KOHLENER, 1995; HERMANN *et al.*, 1998).

Planalto das pequenas depressões

Apresenta uma fisionomia diversificada, mostrando maciços com suas janelas e arcadas, torres, lagos, dolinas e uvalas. O conjunto é coberto por floresta semi-decídua, verde no verão. No inverno, a mata seca deixa transparecer a rocha cinza, sulcadas pelas caneluras de dissolução, semelhante a uma velha face enrugada, por onde se fixam raízes tortuosas de árvores frondosas. Situa-se entre as cotas 800 m e 700 m, sobre um bloco, sobrepondo o cinturão deprimido das uvalas e das planícies cársticas (poliés). No planalto de dolinas situam-se os grandes conjuntos cársticos locais, como o Baú, Borges, Cauaia, Cauê, Confins, Lapa Vermelha (Pedro Leopoldo), Lapinha e Samambaia, (KOHLENER, 1995; HERMANN *et al.*, 1998).

Planícies cársticas do Fidalgo e Mocambeiro

Estudos realizados por Hermann *et al.*, (1998) denominaram essas áreas de poliés pelos carstólogos. As principais características são: nível topográfico abaixo de 670 m, superfície contínua em mais de 4 km, classe de declividade entre 0 e 3 graus, proximidade ao Rio das Velhas (nível de base regional) e alimentação e inundações periódicas pelas águas cársticas. No poliés do Fidalgo, 80% da planície é ocupada pela lagoa intermitente do Sumidouro, em cujo sumidouro se localiza o Rochedo do Fidalgo, palco de ações históricas dos Bandeirantes e sítio arqueológico onde Lund achou o crânio do homem de Lagoa Santa. A planície de Mocambeiro se apresenta ligeiramente ondulada e aloja em sua periferia o maciço de Cerca Grande, o mais espetacular edifício

cárstico da região e o conjunto da Vargem da Pedra, já no perímetro urbano de Mocambeiro (HERMANN *et al.*, 1998).

4.4. Geologia

As feições cársticas da região do carste Lagoa Santa estão desenvolvidas em litotipos neoproterozóicos do Grupo Bambuí, componentes da Formação Sete Lagoas, aflorantes no extremo sudeste da extensa bacia sedimentar pré- cambriana do Bambuí que integra o Cráton do São Francisco (BERBERT-BORN, 2002).

Segundo Martinez (2007), sob a designação de Grupo Bambuí, identifica-se uma das mais extensas e discutidas unidades estratigráficas do Brasil, que vem sendo descrita desde o século XIX. As primeiras referências históricas às rochas carbonáticas e ardorianas, situadas na margem ocidental do rio São Francisco e atualmente designadas como pertencentes ao Grupo Bambuí se devem ao Barão Alemão Von Eschwege que, no ano de 1817, nomeou-as de Formação de Transição “*Ubergangsgebirge*”. Eschwege fez interessantes observações na região de cachoeira de Pirapora, onde descreveu um “*gres vermelho*” que se prolonga pela Serra da Porteira. A essa formação arenosa, essencialmente horizontal, e superposta a “*xistos argilosos mais antigos*”, a denominou de arenito Pirapora, atual Fm. Três Marias (MARTÍNEZ, 2007).

Ainda cabe ressaltar que o Grupo Bambuí constitui um pacote de rochas carbonáticas de sedimentação química, alternadas com terrígenos (PESSOA, 2005). Além disso, a sedimentação do Grupo Bambuí ocorre normalmente sobre uma crosta continental orientada relativamente na direção N-S, por falhas antigas do escudo cristalino (VIANA *et al.*, 1998).

Segundo Cabral (1994), na coluna estratigráfica adotada para os trabalhos de mapeamento geológico, o Grupo Bambuí, na área estudada, é subdividido em duas formações: Formação Sete Lagoas e Formação Serra de Santa Helena.

A Formação Sete Lagoas é constituída por uma sequência de rochas carbonáticas com intercalações de níveis argilosos. As características desses metassedimentos sugerem a existência de um mar epicontinental raso à época de suas deposições, cobrindo o paleorrelevo, constituído pelas rochas gnáissicos-migmatíticas (CABRAL, 1994).

Cabral (1994) aponta que os estágios iniciais de formação dessa bacia se deram pela invasão de áreas continentais pelo mar (ciclo transgressivo), inundando as partes

mais baixas desse paleorrelevo. Devido à circulação restrita das águas em vários pontos da bacia, ocorreu hipersalinidade dessas águas, com precipitação dos carbonatos mais impuros, finos e claros, componentes do membro basal da formação – Membro Pedro Leopoldo, representados pelos litotipos: calcissiltitos e, subordinadamente, calcarenitos e margas. Com o recuo do mar (ciclo regressivo), ocorreu a deposição dos calcários mais puros, grosseiros e escuros, componentes predominantes do membro superior da Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa, representados pelos litotipos: calcarenitos, e subordinadamente, calcissiltitos e calciruditos.

Regionalmente, sob o efeito de ações tectônicas, as rochas mais impuras da Formação Sete Lagoas adquiriram laminação incipiente com abundante formação de minerais micáceos (CABRAL, 1994).

Um último ciclo transgressivo se caracterizou por uma sedimentação em águas calmas e mais profundas, possibilitando a constituição de estratos plano-paralelos, característicos dos metapelitos e metargilitos da Formação Serra de Santa Helena. Os metassedimentos dessa formação se assentam através de contato brusco ou gradacional concordante sobre os calcários do Membro Lagoa Santa da Formação Sete Lagoas. Em outros locais, capeam as rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiviso e, em outros, repousam diretamente sobre os calcários do Membro Pedro Leopoldo (CABRAL, 1994).

Um conjunto de depósitos superficiais, de idades terciária e quaternária, relacionadas a superfícies de aplainamento, formam as planícies fluviais e cársticas, recobrando praticamente toda a área, preenchendo as depressões do paleorrelevo das rochas supracrustais e do embasamento cristalino, ou constituindo depósitos horizontais sobre as superfícies arrasadas dessas rochas.

A tectônica que afetou as rochas supracrustais do Grupo Bambuí originou, na sequência pelítico-carbonática, famílias de fraturas em direções variadas. A deformação parece se relacionar aos esforços compressivos oriundos das faixas marginais dobradas; no caso, o Cinturão Brasília a oeste, e a Faixa de Dobramentos Araçuaí, a leste (SILVA, 1986 *apud* CABRAL, 1994). Sendo assim, as rochas do Grupo Bambuí funcionam como um anteparo rígido (Cráton São Francisco), que assimilou os esforços compressivos refletidos em dobramentos acentuados encontrados próximos às bordas e que diminuem ou desaparecem para o interior da bacia.

O quadro 4.1 fornece um resumo da geologia regional, Mapa do Substrato Rochoso, escala 1:100.000 e exibe a distribuição das rochas do substrato e suas relações de contato.

Quadro 4.1 - Resumo da geologia regional. Base: Mapeamento CPRM, Tuller e Ribeiro, 1992, com modificações.

Unidades Crono-Estratigraf.	Unidades Lito-estratigráfica	Litótipos/Litofácies	Relação de contato	Deformação/Metamorfismo	Ambiente
FANEROZÓICO CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	Aluviões e terraços aluvionares	Disc.	-----	continental
		Depósitos argilo-silticos de cobertura. Depósitos argilosos em cavidades cársticas.	Disc.	-----	continental
	TERCIÁRIO	Depósitos argilo-silticos de cobertura.	Disc.	-----	continental
PRÉ-CAMBRIANO PROTEROZOICO SUPERIOR GRUPO BERIBUI-SUPERIOR GRUPO SERRA FELICIANO SÉRIE JARDOS	FORMAÇÃO SERRA DE SANTA HELENA	Sequência metapelítica, representada por metassiltitos e metargilitos, com estratificação plano paralela.	Brusca, em alguns locais gradacional.	Deformação progressiva e heterogênea, com deslocamento de baixo ângulo. Regime em condições ductil-ruptil a ductil.	Marinho (transgressivo)
	MEMBRO LAGOA SANTA	Sequência carbonática representada predominantemente por calcarenitos e secundariamente por calcissiltitos e calciruditos. Os calcarenitos são calcários cinza escuro a negro, com abundante calcita, preenchendo vazios e fraturas.	Gradacional, às vezes indefinida.	Deslocamento progressiva e heterogênea, com deslocamento de baixo ângulo. Regime predominante ductil-ruptil.	Marinho (regressivo)
	MEMBRO PEDRO LEOPOLDO	Sequência carbonática representada por calcissiltitos e subordinadamente por calcarenitos e margas. Os calcissiltitos são calcários impuros, às vezes, dolomíticos, coloração cinza, com intercalações escuras.	Discordante (angular)	Idem Membro Lagoa Santa, com maior efeito de ações tectônica sobre os calcários impuros.	Marinho (transgressivo)
ALDOREO	COMPLEXO GNÁISSICO MIGMATÍTICO-INDIVISO	As rochas são representadas por gnaisses, granitóides e migmatitos, intensamente recortadas por veios e diques de rocha básica.	-----	Deformação polifásica, gnaissificação, migmatização. Metamorfismo grau médio, com alterações hidrotermais.	-----

Fonte: Cabral, (1994).

4.5. Hidrogeologia

O sistema aquífero cárstico é altamente heterogêneo, anisotrópico e sua vulnerabilidade à contaminação é muito grande devido suas características geomorfológicas especiais que desempenham um papel fundamental na interação com a água superficial e subterrânea (Figura 4.3).

A hidrogeologia da área compreende uma superfície livre de aquíferos carbonáticos, limitada na base por rochas gnáissicas, impermeáveis, em que os aquíferos subterrâneos fluem por meio de dois níveis de base: ao nordeste, o Rio das Velhas é a principal saída para a água cárstica e, ao sudoeste, o Ribeirão da Mata drena parte dessa água (AULER, 1994).

Os estudos hidrogeológicos desenvolvidos na área de estudos estão focados na zona saturada. Segundo Pessoa (2005) as estruturas de dissolução e, principalmente as fraturas estão entre as áreas mais importantes de recarga do aquífero. Ribeiro *et al.*, (2019) ressaltam que as fraturas e dutos de dissolução controlam o sentido de fluxo do Membro Lagoa Santa que é predominante de sudoeste a nordeste ou de oeste para leste.

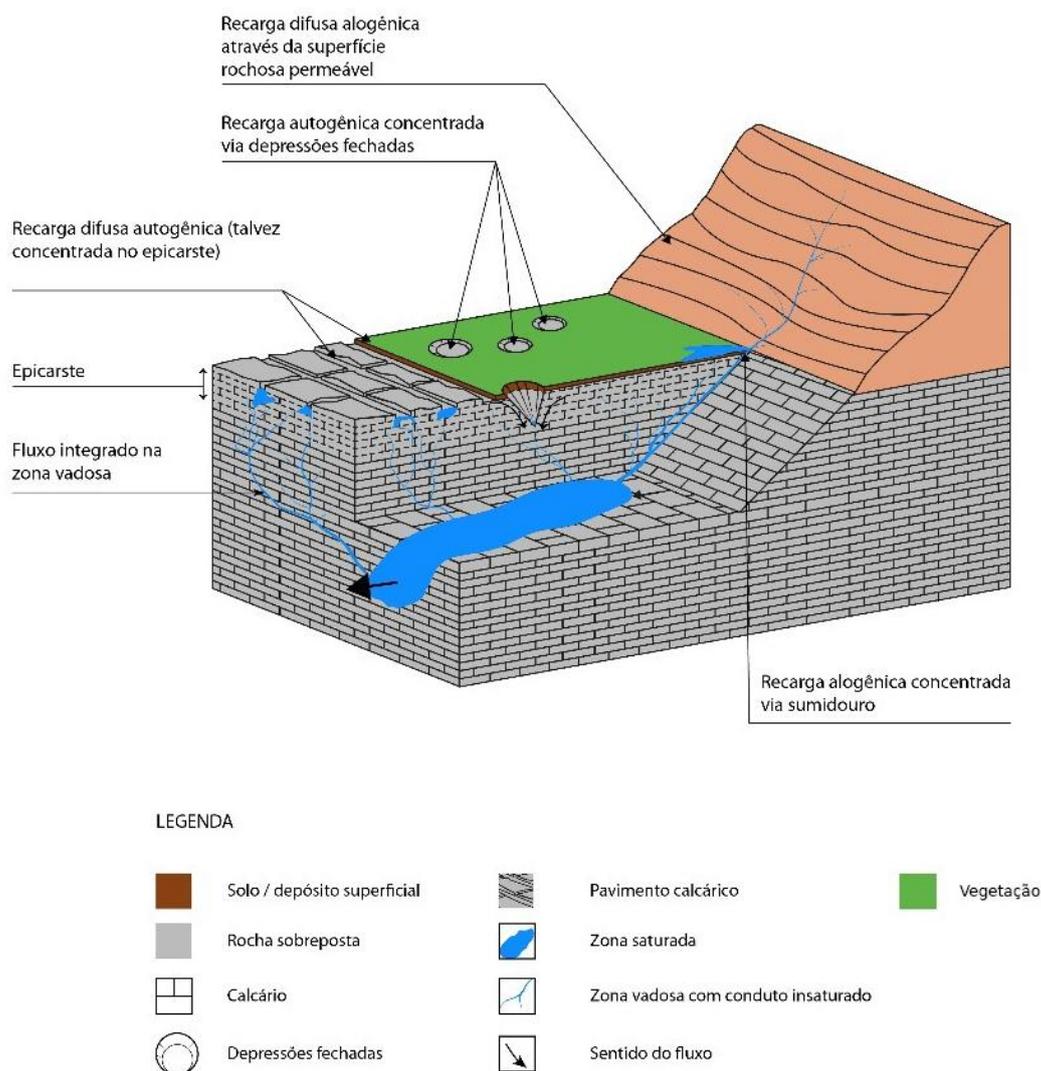
Segundo De Paula (2019), essa unidade é marcada pela alta produtividade dos poços e nascentes caudalosas, feições geomorfológicas características de um carste bem desenvolvido, exibindo elevados valores de condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento. Já os metapelitos da Formação Serra de Santa Helena são localmente representados por um aquífero, representado tipicamente por material altamente intemperizado cujo levantamento estrutural mostrou que as fraturas presentes estão fechadas ou preenchidas por argilominerais. Esse mesmo autor resalta que os perfis litológicos dos poços tubulares que atravessaram esta unidade não apresentaram entrada de água e/ou registros de nível de água na região, caracterizando-o como aquífero. Localmente, este pode funcionar como um aquífero suspenso pobre e de baixa produção ou como zonas de recarga para o aquífero carbonático subjacente (assim como os sedimentos aluvionares e dentrito-lateríticos).

A maioria dos livros clássicos em hidrogeologia dá ênfase à zona saturada, porém a utilização de algumas leis clássicas da “hidrogeologia saturada” na “hidrogeologia vadosa” como por exemplo a Lei de Darcy (apresentada no item 6.4). Um aspecto que sofre alterações é que na zona vadosa a carga de pressão é negativa (menor que a pressão atmosférica). Apesar da grande similaridade e de grande utilidade, muitos erros resultam da aplicação ingênua desses conceitos criados para a hidráulica da zona saturada para prever processos na zona vadosa (SELKER *et al.*, 1999). Neste estudo, a interação superficial e subterrânea das águas no modelado cárstico é o foco da pesquisa, o que influencia diretamente na vulnerabilidade do aquífero por meio do método estudado. Nesse sentido, o epicarste, ou “pele do carste”, desempenha um papel importantíssimo nessa interação. Nenhum estudo com foco na hidrologia da zona vadosa foi encontrado nas referências sobre a área de estudo.

Klimchouk (2000) afirma que os valores de porosidade primária nos calcários podem variar de 2 a 15%, onde a menor porosidade é encontrada nos calcários micríticos e metamorfisados. Galvão (2015) destaca que o aquífero superior da área de estudo é formado por rochas metassedimentares neoproterozóicas da Formação Serra de Santa Helena e possui porosidade primária muito baixa. A porosidade secundária é

igualmente reduzida, e o grande volume de água migra por meio da porosidade terciária. De acordo com Salgado (2016), a porosidade primária encontrada para os calcários da Formação Sete Lagoas é pouco menor que 3%.

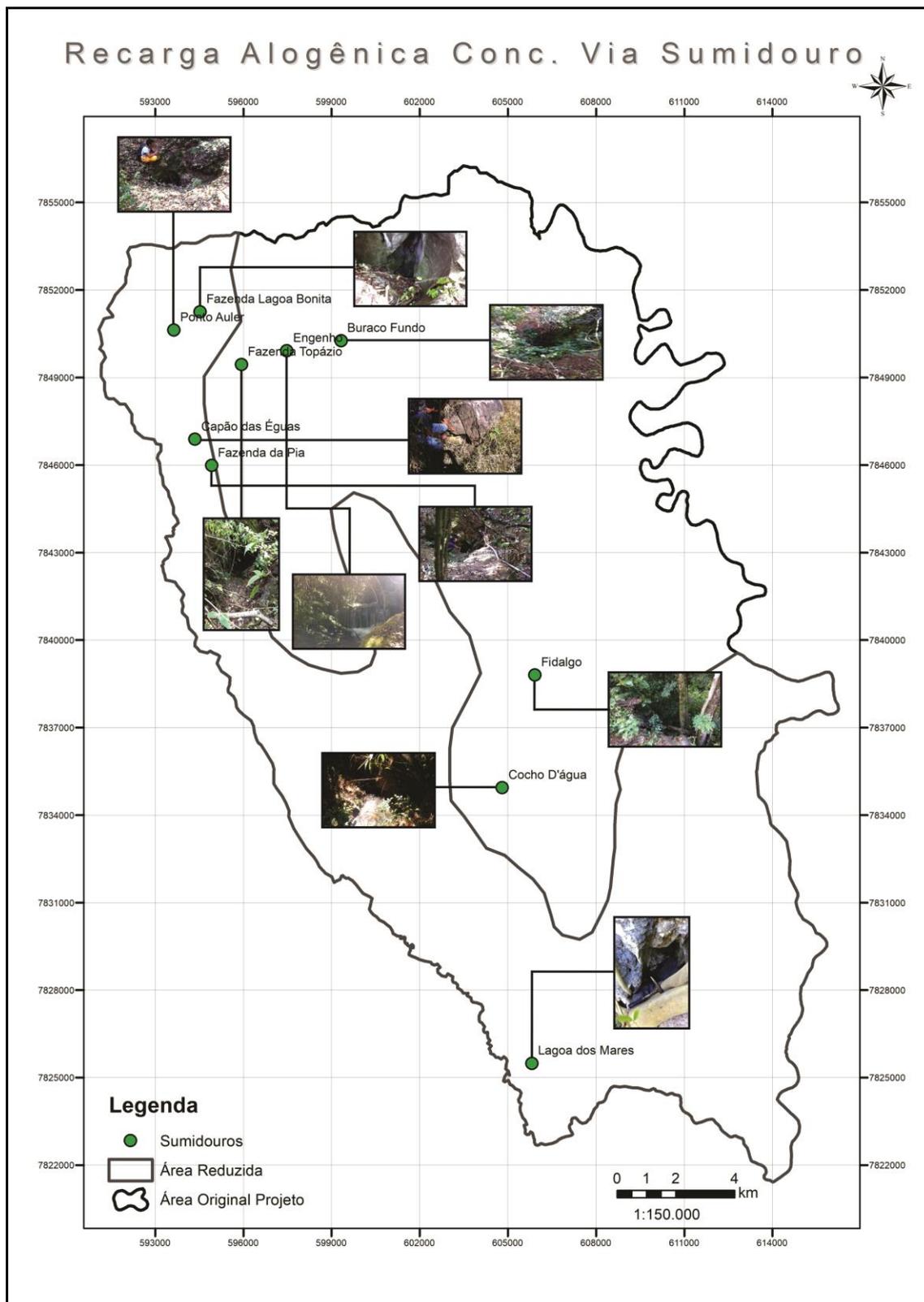
Figura 4.3 - Modelo conceitual com as características cársticas e geomorfológicas que estão diretamente associadas à vulnerabilidade intrínseca à contaminação e sua interação com água superficial e subterrânea no modelado cárstico.



Fonte: Modificado de GUNN, (1985).

Pode-se observar pelas fotos mostradas na Figura 4.4 que a recarga alogênica concentrada via sumidouro na área estudada é fundamentalmente representada onde há afloramento de calcário.

Figura 4.4 – Pontos observados de recarga alogênica concentrada na área de estudo.



Alguns autores têm dado o nome de “epicarste” ao aquífero suspenso que se forma na parte mais superior da zona vadosa. Outros observam que as fraturas abertas situadas nessa zona facilitam a infiltração da água de chuva em subsuperfície, porém criam um gargalo para a movimentação da água em partes mais profundas devido à diminuição da frequência e tamanho da abertura dessas fraturas (JONES, 2013).

As ocorrências desse aquífero suspenso na parte superior da zona vadosa é explicada pelo grande contraste na estrutura de porosidade existente na camada de rochas mais carstificadas do epicarste (não só devido aos processos de dissolução, mas também ao processo geológico de liberação de tensão ao expor a rocha em superfície ou próxima a ela e à camada de rochas não saturadas da zona vadosa logo abaixo do epicarste, bem como pela escassez de drenos mais eficientes nessa camada e não por causa da baixa capacidade hidráulica destes drenos.

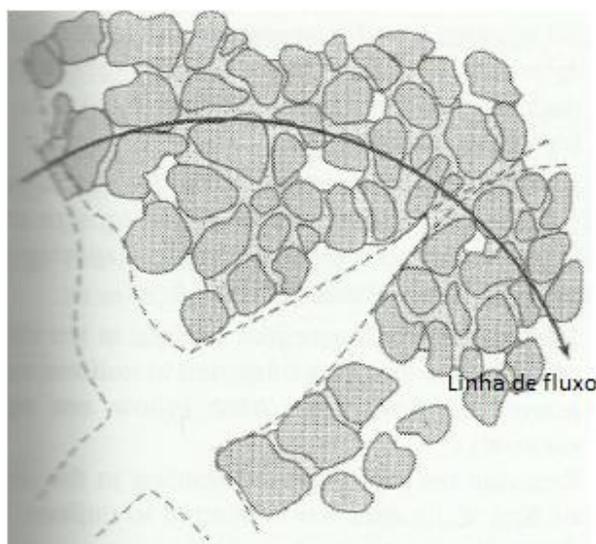
A capacidade de armazenamento do epicarste depende da maturidade e do contraste de condutividade hidráulica existente entre as rochas das camadas mais inferiores da zona vadosa. A percolação dessa água até o aquífero pode durar entre alguns dias até meses, e é responsável por manter um fluxo de base por longos períodos de secas (KLIMCHOUK, 2000).

Outra condição importante de se salientar que influencia no processo de infiltração de potencial contaminante e na atenuação é que se a superfície do epicarste possui uma camada de solo, as finas partículas de matéria orgânica são arrastadas para dentro das fraturas situadas no epicarste e dentro da zona vadosa, logo abaixo da superfície, criando um retardamento da percolação e um reservatório rico de matéria orgânica (WILLIAMS, 2007; JONES, 2013). Este processo é de fundamental importância na área estudada, haja vista que o carste da região de Lagoa Santa é em parte encoberto e, quando não, tem porosidade secundária muitas vezes preenchida por recristalização de calcita (GALVÃO, 2015; PESSOA, 2005; SALGADO, 2016).

Alguns fenômenos muito interessantes no processo de infiltração no epicarste são relatados por Domenico e Schwartz (1997), Selker *et al.*, (1999) e outros. Um deles se relaciona ao fluxo no meio fraturado, onde nem sempre a água procura as fraturas para se infiltrar. Domenico e Schwartz (1997) apontam que a água somente infiltrará nas fraturas quando a taxa de infiltração no solo for menor que a taxa de precipitação. Quando a taxa de infiltração do solo supera a taxa de precipitação, a água é levada a saturar primeiro os poros da matriz rochosa. Isto é entendido pelo processo de capilaridade que reconhece que poros maiores (fraturas) dessaturam primeiro e os poros

menores por último. Portanto, as fraturas tendem a permanecer secas quando as aberturas são largas, com sua superfície (paredes) portanto filmes de água ou alguma água contínua contida nas microaberturas que essas fraturas podem conter. Essa água de fluxo paralelo à descontinuidade é chamada de “capacidade de desvio” da abertura, sendo a quantidade de água que a abertura pode desviar lateralmente através de um meio mais fino. A fratura seca tem uma condutividade hidráulica menor que a condutividade da matriz rochosa parcialmente saturada. O ar contido nas fraturas secas exerce uma infinita resistência ao fluxo, exceto nos lugares onde existe água nas microaberturas. Portanto, são essas microaberturas saturadas que promovem a transferência de água de um bloco rochoso ao outro. Conforme é mostrado na Figura 4.5, água evita passar pelas fraturas secas, formando uma barreira para o fluxo ao longo da fratura (DOMENICO e SCHWARTZ,1997).

Figura 4.5 - Modelo conceitual do meio fraturado parcialmente saturado, mostrando as linhas de fluxo circundando as porções secas das fraturas.



Fonte: Modificado de Domenico e Schwartz, (1997).

O entendimento do epicarste não se revela somente na questão de infiltração de água de chuva e potenciais contaminantes. Ele também tem uma importância significativa no que diz respeito à fauna subsuperficial do carste. No que diz respeito à contaminação, as diretivas europeias de proteção de água subterrânea se preocupam também não só com proteção desse especial recurso, mas também com proteção das espécies que vivem neste meio.

Haja vista que existem padrões de qualidade da água que não somente asseguram a qualidade para consumo humano, bem como para proteção dessas espécies. Nesse sentido, Pipan e Culver (2007) apontam a necessidade dos hidrogeólogos do carste atentarem para vida aquática existente no epicarste. Os copepódes⁵ que vivem no epicarste têm o corpo mais alongado na direção do fluxo da água subterrânea podendo ser utilizados como traçadores da potencial rota de contaminantes. Esses mesmos autores exemplificam que em fluxos subterrâneos de cavernas situadas no sudoeste da Eslovênia e oeste do estado da Virgínia, uma significativa população de copepódes vive em uma extensão linear de menos de 100 m, sugerindo que um padrão restrito de fluxo lateral é evidenciado nesse sistema. Apesar do foco da hidrogeologia ser o movimento vertical da água no epicarste, principalmente por causa do caminho de percolação de potenciais contaminantes, a água no epicarste pode fluir lateralmente durante períodos de altas recargas.

Algumas feições cársticas localizadas no exocarste, tais como alguns tipos de dolinas, são hidrologicamente conectadas diretamente ao epicarste, enquanto outras podem drenar mais diretamente para os condutos mais profundos situados no aquífero, onde o epicarste representa um importante papel. A água no epicarste dentre as várias formas, pode ser armazenada por um período ou por vários anos, e as perdas podem se dar por evapotranspiração, percolação rápida por meio de *shafts* (condutos verticais), largas juntas ou se infiltrarem lentamente via pequenas fraturas “limpas” ou preenchidas por material fino das camadas superiores. Em períodos de elevadas precipitações, esta água armazenada no epicarste, por um período ou vários anos, é forçada a descer ou mover lateralmente, empurrada por essa nova água que está infiltrando (JONES, 2013). Esse fenômeno é chamado por Trček (2007) de efeito pistão onde, baseado em numerosos argumentos, o modelo presume que o fluxo para o aquífero e os mecanismos de transporte de soluto e, conseqüentemente o movimento dos potenciais contaminantes, depende do comportamento hidráulico da zona do epicarste.

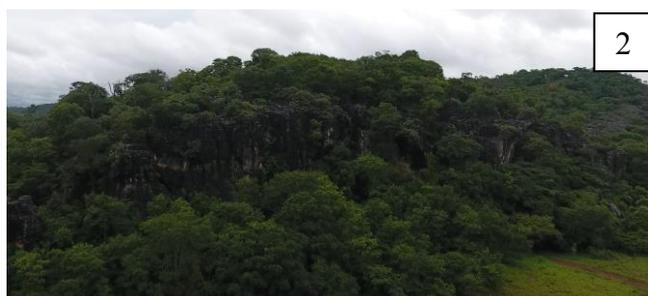
Amaral (2018) realizou um estudo de identificação de uma das feições cársticas localizadas no exocarste da área estudada (dolinas) e analisou o comportamento de armazenamento de água nas mesmas em dois períodos distintos: 2010 (ano de normalidade pluviométrica, ou seja, 1354,7 mm) e 2014 (ano de extrema estiagem com

⁵ Os copépodes são um grupo de crustáceos muito importante na composição da fauna de invertebrados aquáticos.

índice pluviométrico de 564 mm). Ele observou que, no período de estiagem, a tendência é a diminuição do espelho d'água das depressões devido aos fenômenos de evapotranspiração e recarga subterrânea indireta derivada dos lagos, e no período chuvoso a tendência é de aumento dos espelhos d'água das depressões, em decorrência da precipitação direta e de recarga subterrânea. Esse mesmo autor concluiu que das 393 depressões cársticas detectadas na área de estudo, 46 acumulam e reservam água durante um ano normal de chuva, sendo que 70% destas permanecem perenes durante todo o ano, podendo recarregar o aquífero de forma lenta e difusa. As demais 347 depressões que não acumulam água desempenham um importante papel na recarga do tipo concentrada.

Recarga alogênica concentrada por meio de lapiás e infiltração por meio de discontinuidades localizadas no epicarste é observada na área de estudo (Foto 4.1). Na foto é observado que uma pequena parte sai no meio do maciço e o restante recarrega o aquífero, mostrando a importância da recarga direta por meio do epicarste. Na Foto 4.1 (1 e 2) foram tiradas imagens no mesmo evento de precipitação e mesmo afloramento.

Foto 4.1 – Infiltração no exocarste via fraturas(1) e discontinuidades em afloramento (2). Nesta foto, observa-se que parte da água de infiltração que encontra uma “saída” no meio do maciço calcário, evidenciando o importante papel do epicarste na recarga do aquífero.



Estudos hidrogeológicos no epicarste ainda estão sendo realizados em vários lugares no mundo. Estruturalmente, o epicarste apresenta diferenças em termos de uniformidade de fraturas na parte mais superficial até 30,0 m da superfície do que na parte mais profunda, uma vez que as aberturas das fraturas crescem exponencialmente em direção a superfície (Klimchouk 2000).

As condições de circulação das águas subterrâneas em aquíferos carbonáticos podem ser consideradas como unidades interativas de alta condutividade, organizadas por uma rede de condutos (regime turbulento) associadas a unidades de baixa permeabilidade representadas por fissuras na matriz rochosa (regime laminar). Essas condições se mostram muito dependentes da capacidade de dissolução das rochas carbonáticas e de sua densidade de descontinuidades (MARTIN e WHITE, 2008). Na Formação Sete Lagoas se destacam as feições morfológicas lapiás e fendas de dissolução no epicarste e, no endocarste, condutos freáticos, que por via de regra, são condicionados por estruturas como acamamento e planos de fraturas por onde circula a maior parte da água subterrânea (SALGADO, 2016).

Segundo Cabral (1994), na área da APA Carste de Lagoa Santa, existem três tipos de aquíferos: porosos, fissurados e cársticos. Pessoa (1996) pondera que o primeiro tipo está representado por materiais de porosidade primária, derivados dos processos pedogênicos, cuja intensidade determinada pela atuação intempérica das rochas constitui espessas zonas de cobertura regolítica com a amplitude das isópacas variando de 2 a 40 m. Devido à baixa permeabilidade desses materiais inconsolidados, geralmente atribuída à presença de grande quantidade de argilas, estes aquíferos comportam apenas poços escavados (cisternas) para atender pequenas comunidades. Em geral, são solos pouco transportados – elúvio-coluvionares, cujo potencial de armazenamento está restrito aos interstícios porosos, na forma de aquíferos freáticos e de extensão variável.

Ainda, de acordo com Cabral (1994), os aquíferos fissurados são encontrados na área de ocorrência da Unidade Metapelítica e do Complexo Gnáissico-Migmatítico Indiviso. Geralmente, são aquíferos pobres, com pouca água subterrânea armazenada em seu sistema de fratura. Sua capacidade de armazenamento e circulação de água subterrânea estão restritas às zonas de interconexão de fraturas. Caracterizam-se por uma trama estrutural interligada aos aquíferos cársticos sotopostos. Nas faixas de intercalações calcárias, podem corresponder a um aquífero cárstico-fissural (CABRAL, 1994).

O mais importante sistema de aquífero regional é o cárstico, tendo em vista sua capacidade de circulação, infiltração e armazenamento de água subterrânea. Ele constitui a base de fornecimento de água urbana, rural e industrial dos principais municípios da região, correspondendo essencialmente à faixa de rochas calcárias, onde o fluxo e o armazenamento estão condicionados por condutos de fraturas alargadas por dissolução do material carbonático (CABRAL, 1994).

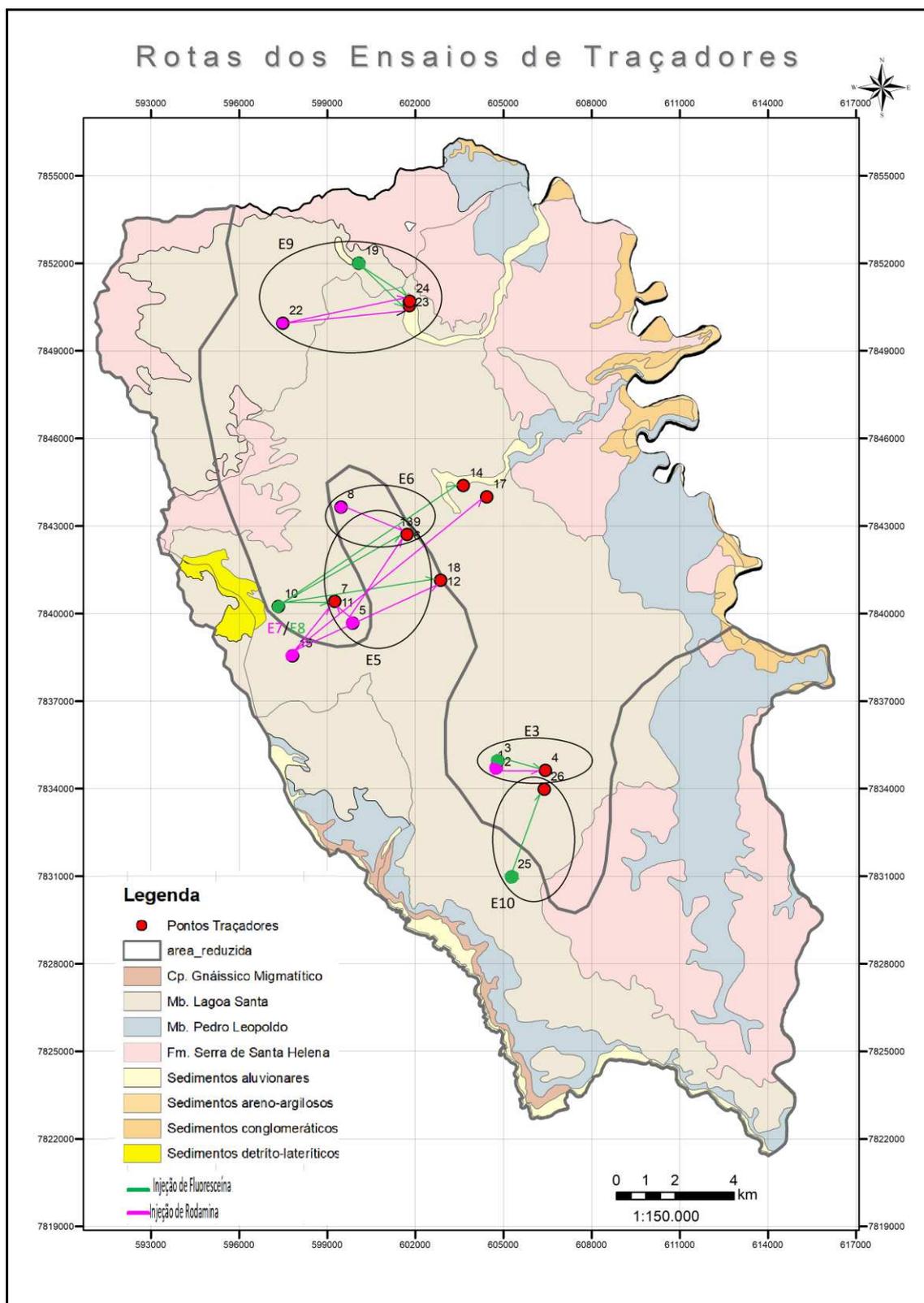
São normalmente controlados pelo grau, tipo e direções de fraturamento dos complexos Calcarenítico e Calcissiltítico. No âmbito do endocarste, o aquífero está confinado a fraturas devido à baixa porosidade dos calcários e nos condutos.

Estudos aplicando técnicas com traçadores corantes (Fluoresceína e Rodamina WT) em sumidouros, surgências e cavidades foi desenvolvido por Teodoro *et al.*, (2019) com o objetivo de conhecer as condições hidrodinâmicas dos aquíferos constituídos pelas formações cársticas da área de estudo. Foram realizados dez ensaios (E1 a E10), onde sete apresentaram resultados positivos, permitindo interpretar direções e velocidades de fluxo. A Figura 4.6 mostra as rotas confirmadas por estes ensaios. Na Foto 4.2 é mostrada a aplicação de Rodamina no ponto do sumidouro do Engenho.

Foto 4.2 – Injeção de rodamina em sumidouro.



Figura 4.6 – Rotas confirmadas nos ensaios positivos com traçadores corantes.



Fonte: Adaptado de Teodoro *et al.*, (2019).

Os ensaios demonstraram que as maiores velocidades de fluxo subterrâneo encontradas na área de estudo se situam na porção norte (E9), com velocidade máxima

de 7,33 cm/s, e a menor na porção centro-oeste (E5) com velocidade mínima de 1,25 cm/s. As velocidades dos ensaios E3 e E10 são praticamente iguais, variando de 3,13 cm/s a 3,21 cm/s. O ensaio E6 apresentou a segunda maior velocidade de fluxo, na ordem de 4,8 cm/s. O ensaio E7/8 apresentou velocidades variando de 2,14 cm/s a 3,38 cm/s. A partir destes resultados, intui-se que a porção mais carstificada é a norte (E9) da área de estudo, seguida da porção centro-norte (E6), porção centro-sul (E3 e E10), oeste (E7/8) e por último E5.

4.6. Hidrografia

O carste da região de Lagoa Santa é bem desenvolvido em grande parte da área, principalmente na região norte, conforme já demonstrado pelos ensaios de traçadores. Dolinas e sumidouros alimentam, juntamente com a infiltração difusa em terrenos permeáveis, um complexo sistema de drenagem subterrânea, onde os principais exutórios são as surgências e nascentes.

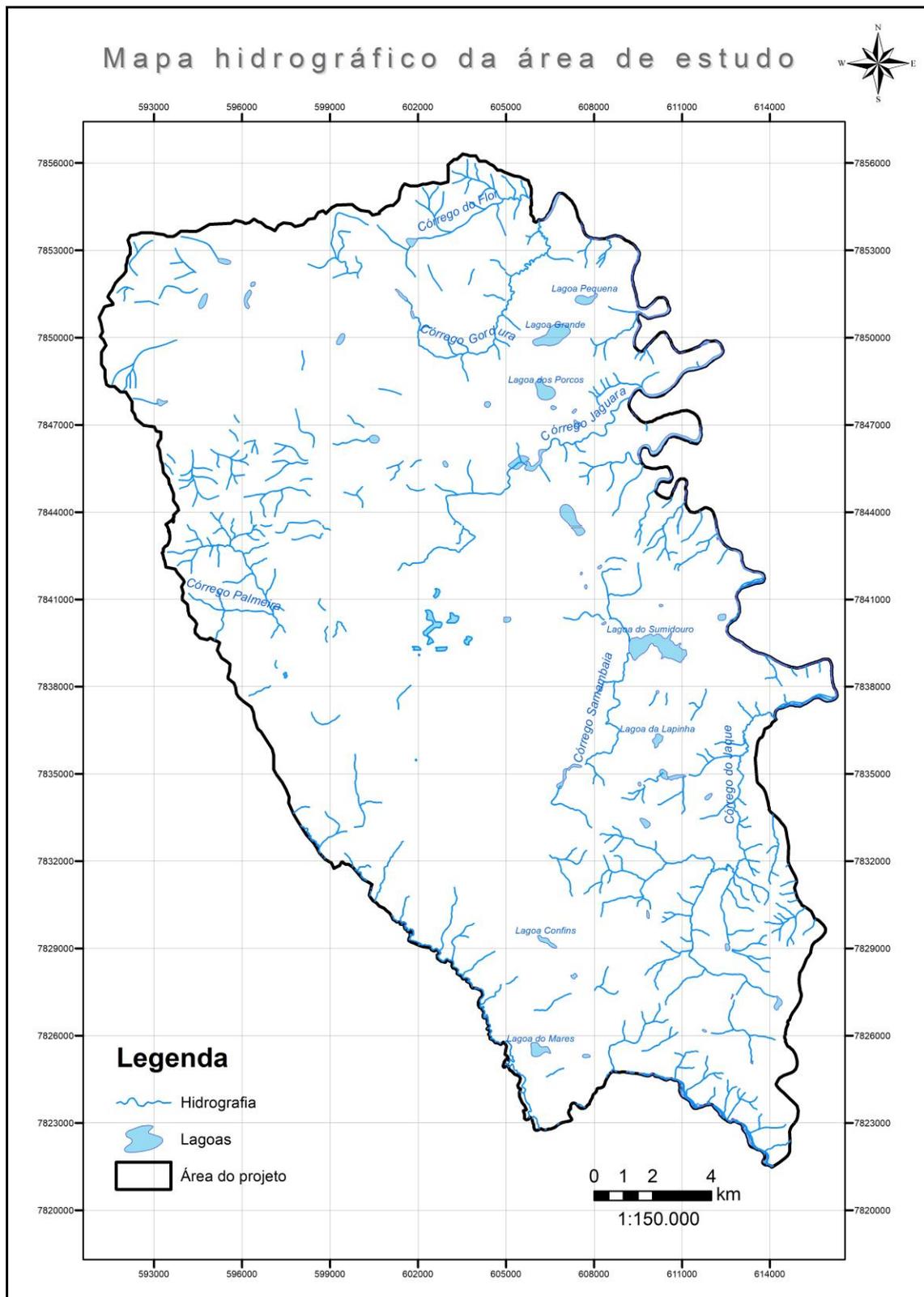
Alguns dos principais cursos d'água da região do carste Lagoa Santa têm suas nascentes provenientes de surgências em afloramentos de calcário e, por vezes, suas águas drenam para condutos subterrâneos, ressurgindo pouco mais a jusante. Na foto 4.3 é apresentada a surgência da Fazenda Topázio, a qual poucos metros a jusante, infiltra suas águas no sumidouro do Engenho.

Foto 4.3 – Surgência Fazenda Topázio.

Grande parte das águas pluviais que alcançam as dolinas e sumidouros são captadas e transportadas por esses condutos, percorrendo caminhos de difícil detecção e se distribuindo de forma não bem conhecida, até novamente aflorarem na superfície (VIANA *et al.*, 1998). Assim sendo, os sistemas de água superficial e subterrânea apresentam, na área de estudo, uma complexa inter-relação, o que torna a região do carste Lagoa Santa bastante susceptível à contaminação hídrica, à medida que a expansão urbana, o desmatamento e o uso do solo em atividades agropecuárias potencializam os riscos de poluição dos cursos d'água, lagoas, dolinas e, conseqüentemente, dos aquíferos cársticos, por meio do lançamento de esgotos e efluentes, e do aporte de sedimentos e resíduos de agrotóxicos. Estes poluentes, uma vez captados pelo sistema de condutos sub-superficiais, ao contrário de se concentrarem nas zonas adjacentes, como ocorre em terrenos granulares, podem ser transportados por distâncias significativas, com relativamente pouca dispersão (VIANA *et al.*, 1998). Estes aspectos assumem maior importância à medida que a água subterrânea se torna a principal fonte de abastecimento das populações residentes na região.

Segundo Berbert-Born *et al.*, (2002), as principais sub-bacias hidrográficas são definidas pelos córregos Samambaia, Palmeiras-Mocambo e Jaguará e o riacho do Gordura, para onde são drenadas as águas pluviais, em grande parte capturadas pelos inúmeros dolinamentos ao longo da área (Figura 4.6). Os limites destas bacias ainda não são perfeitamente reconhecidos porque muitas rotas de fluxo subterrâneo ainda são desconhecidas. Todas elas têm descarga final ou no rio das Velhas ao nordeste, ou no ribeirão da Mata ao sudoeste, níveis de base regionais. Auler (1994) considera as bacias dos córregos Samambaia e Palmeiras-Mocambo como as maiores bacias de drenagem da região. Ainda de acordo com este autor, Peter Lund foi o primeiro a descrever a grande ocorrência de lagoas nesta região (Figura 4.7), onde são mais frequentes na depressão de Mocambo com predominância dos tipos sobre filitos, dolinas e afloramento do freático sobre as camadas de calcário.

Figura 4.7 – Hidrografia da área de estudo.



Fonte: Modificado de VIANA *et al.*, (1998).

5. CONSIDERAÇÕES SOBRE UTILIZAÇÃO DO MÉTODO COP ORIGINAL

O método foi conceitualmente desenvolvido por Daly *et al.*, (2002), mas não foi proposta uma orientação prática como tabelas ou fórmulas para a sua utilização. Então, o método COP foi proposto por Vias *et al.*, (2006). Estes autores consideraram o método, com todas as suas variáveis hidrogeológicas do meio cárstico, aplicável em diferentes condições climáticas europeias e tipos de aquífero cárstico.

Todavia, Daly *et al.*, (2002), em sua proposta original, esclareceram sobre a necessidade de desenvolvimento de um método que fosse flexível e que facilitasse a sua aplicação em diferentes regiões europeias com dados disponíveis e que abrangessem condições climáticas diferentes. Esta última condição deixou bem claro que o método foi concebido para utilização em países de clima mediterrâneo e europeu.

Entretanto, observa-se em alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil um equívoco sobre a aplicação direta do método neste e em outros quesitos. Conforme exposto na metodologia, o “Fator O” desempenha um papel fundamental na proteção do aquífero cárstico, principalmente na recarga difusa autogênica, e como a condição climática é um dos fatores que contribui para a formação dos solos, sua aplicação em diferentes condições climáticas deve ser feita com adaptações.

Conforme exposto por Pagano (2018), os índices de vulnerabilidade, para serem aplicados, devem primeiramente levar em consideração a escala do estudo, ou seja, diferem de região para região.

Além disso, o método COP exige uma complexa análise e disponibilidade de dados para ser aplicado, haja vista que a natureza de cada sistema cárstico é individualizada, levando à necessidade de uma investigação detalhada do sistema hidrogeológico e de elevada qualidade de dados da zona vadosa como condição fundamental para aplicabilidade do método. O método exprime a complexidade do sistema cárstico, o que demonstra a necessidade de sua adaptação para diferentes localidades.

Isso pode ser verificado quando se utiliza o método original em condições climáticas tropicais. Conforme já exposto no item 3.1.1, os solos que recobrem o carste tropical da área de estudo são extremamente espessos quando comparados aos solos que recobrem o carste europeu.

A necessidade de adaptação se torna evidente quando no cálculo do “Fator O”. Como a mineralogia dos solos tropicais é essencialmente rica em argilominerais, e, principalmente, o argilomineral caulinita, o fator O_s para solos tropicais da área de estudo será acima de 30% de argila, e como consequência da origem da formação desses solos bem desenvolvidos com espessura raramente inferior a 1,0 m devido ao alto grau de intemperização existente, resulta em um valor de proteção O_s alto.

Para valores $> 1,0$ m de espessura de solo, não importando se é 1,01 m ou 50,0 m de espessura, o fator O_s será igual a 5 (máxima proteção). É sabido que o tempo de residência de contaminantes na zona vadosa é de extrema importância na atenuação natural, portanto, a espessura da camada de solo acima de 1,0 m, na realidade tem importância quando se leva em consideração a condutividade hidráulica, pois o par condutividade hidráulica e espessura do solo é que determinará o tempo de residência. Além disso é na camada de solo da zona vadosa que ocorrerão as reações de atenuação natural em subsuperfície.

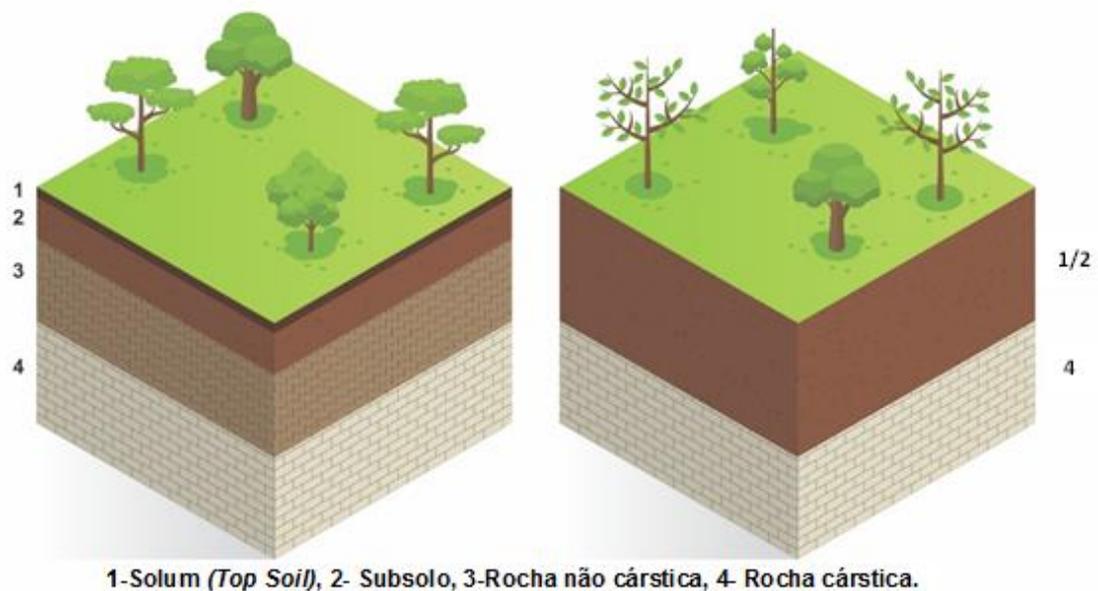
Como os estudos desenvolvidos até o presente momento no Brasil, não apresentam uma interpretação clara dos conceitos por detrás do método, e somente o aplicou sem a devida modificação, observa-se alguns erros de interpretação. Por isso foi elaborada uma exaustiva pesquisa para se compreender o método original no que se refere ao parâmetro escolhido para ser modificado. Buscou-se compreender a geologia e a pedologia do sul da Espanha, onde a metodologia foi desenvolvida. Dentre os vários estudos consultados, foram selecionados alguns estudos relevantes que deram informações detalhadas para o entendimento mais profundo do “Fator O” do método original: Guerrero e Gómez (1966) estudaram a morfologia, sistemática e cartografia dos solos da Andaluzia Ocidental, Rodriguez e Martinez (1966) estudaram por espectrografia de infravermelho as argilas de alguns solos da Andaluzia Ocidental (solos sobre materiais e calcários terciários), Rodriguez (1989) caracterizou os solos da zona de Fuentes de Andaluzia e Megia e Munõz (2006) realizaram um detalhado estudo sobre a Geodiversidade e Patrimônio Geológico de Andaluzia.

Estes estudos revelaram, conforme apresentado no Anexo 2, o porquê das espessuras tão baixas utilizadas no método original para o *top soil* (horizontes A+B definido pelo método), sendo o fator O_s melhor representado pelo subsolo, localizado logo abaixo do *top soil*.

A abordagem COST 620, segundo Zwalen (2004), divide o subfator O_s em espessuras de *top soil* e subsolo, sendo que o *top soil* tem espessura pouco

representativa por ser inexistente ou de espessura desprezível para os processos de atenuação natural. Já o subsolo é constituído por areia, silte, argila ou aluvião, sendo aqui os fatores relacionados à macroporosidade menos representativos que no *top soil*. A Figura 5.1 ilustra as realidades do sul da Espanha (à esquerda), e a observada na região do carste Lagoa Santa (à direita).

Figura 5.1 - Comparação do que é observado entre a zona vadosa do carste europeu e tropical para o método COP.



Outra observação verificada é quanto ao subfator O_L . Não há no método original a opção de $l_y = 0$, isto é, ausência de rochas na zona vadosa (epicarste) por mais espessa que a zona vadosa possa ser (Figura 9.2) como típico do carste coberto. Ressalta-se que para o fator O_s existe a opção $O_s = 0$ (a não existência de solo na zona não saturada). Isso demonstra, claramente, a forte influência do método concebido para ser aplicado em países de clima temperado com solos pouco desenvolvidos, de pequena espessura e abundante em argilominerais 2:1.

Conforme apontado por Zwalen (2004) geralmente o carste não apresenta uma cobertura de solos e a proteção do aquífero é dada pelo epicarste, constituído por material consolidado. Esta condição não é a observada na região do carste Lagoa Santa. Em solos tropicais que recobrem o carste, não é raro encontrar grandes espessuras de argila recobrindo o aquífero, sem a observação de rochas. Conforme Piló (2000), no Brasil existem diversos carstes cobertos ou predominantemente cobertos por espessas

coberturas pedológicas; dentre eles está a área de estudo. Nesse caso, a utilização do método original supervalorizaria a proteção do aquífero, pois se utilizaria da textura e litologia que mais atenua no método ($O_s > 30,0\%$ de argila com espessura maior que 1,0 m) e litologia argilosa que confere o máximo valor ao subfator $ly = 1500$).

6. ÍNDICE DE ATENUAÇÃO NATURAL (IAN) DO SOLO CÁRSTICO DA ÁREA DE ESTUDO

A vulnerabilidade de um aquífero é inversamente proporcional à capacidade de proteção da água subterrânea. À medida que se conhece a capacidade de atenuação dos contaminantes pode-se estimar se o recurso está suficientemente protegido ou se a contaminação é um fato inevitável. Os processos físicos, químicos e biológicos que modificam as propriedades dos contaminantes são processos que permitem medir, diretamente, qual é a capacidade de atenuação e proteção da água subterrânea e, paralelamente, quanto e quão vulnerável é um aquífero frente aos potenciais contaminantes (MARTINEZ, 2005).

A importância de estudar a atenuação natural de potenciais contaminantes que a zona vadosa propicia aos aquíferos cársticos é de extrema importância, haja vista que a recarga autogênica difusa é o principal contribuinte da recarga dos aquíferos cársticos. Cita-se, como exemplo, um estudo elaborado por Aley (1977) no estado de Missouri nos Estados Unidos, o qual quantificou as recargas concentradas por dolinas e sumidouros que infiltram diretamente água de *runoff* e que “engolem” rios. O autor chegou à conclusão de que a recarga por meio de dolinas era quatro vezes menor que a recarga autogênica difusa e que a recarga por sumidouros era duas vezes menor. Além disso, a intensa atividade microbiológica presente, principalmente nas camadas mais superiores da zona vadosa, é responsável por um dos processos mais importantes de atenuação natural que se dá por meio da biodegradação.

Segundo Heredia e Fernández Cirelli (2008), as metodologias apontadas para avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, frequentemente são realizadas sem levar em consideração as propriedades físicas e químicas do solo. A criação do índice de atenuação natural dos solos desenvolvidos sob o aquífero cárstico da área de Lagoa Santa foi concebido similarmente a metodologia desenvolvida por Heredia e Fernández Cirelli (2008), que por sua vez, foi originalmente proposta para estimar o índice de

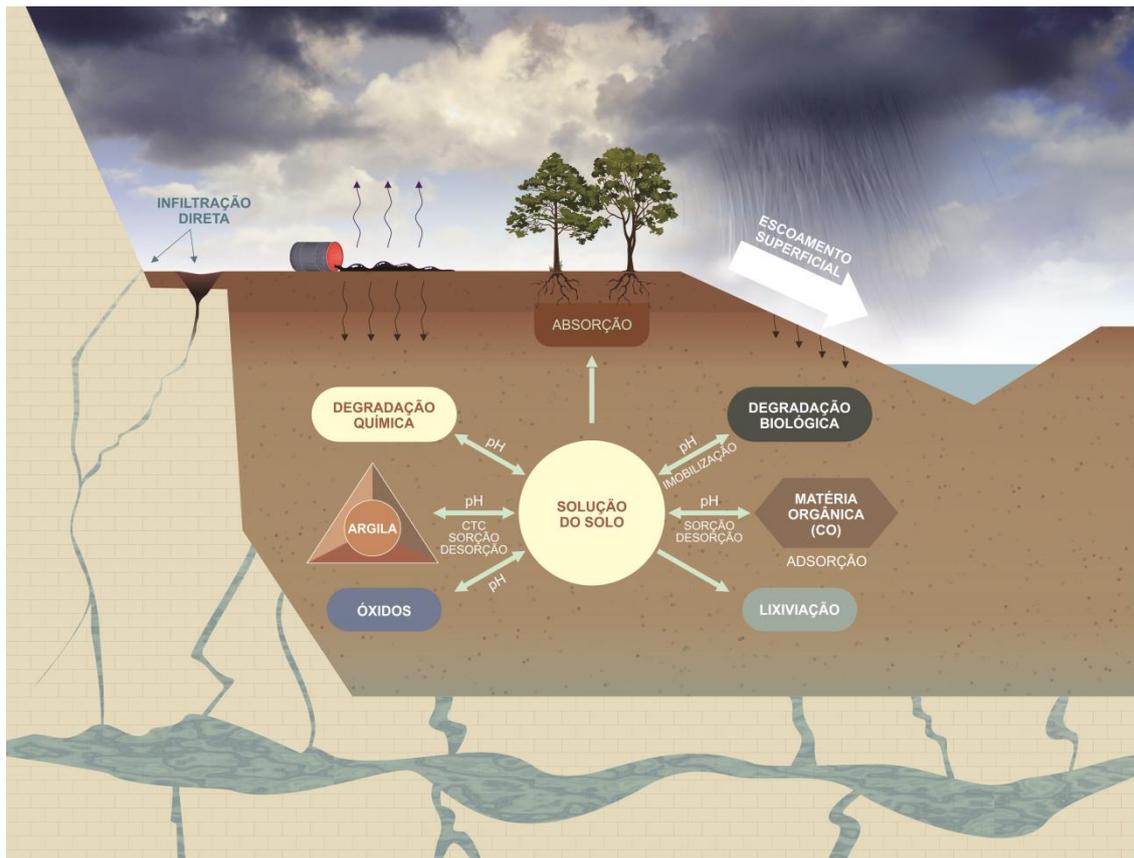
qualidade de água e modificada para aplicação de risco de contaminação das águas subterrâneas. A aplicação adotada para o carste tropical também foi modificada para esta tese e levou em consideração os parâmetros que mais influenciam na atenuação natural de potenciais contaminantes nos solos e nos processos de infiltração em condições tropicais: espessura de solo, porcentagem de argila, CTC, carbono orgânico-CO, pH, condutividade hidráulica e mineralogia, esta representada pela relação caulinita/óxidos.

A Figura 6.1 mostrada a seguir, sintetiza os principais parâmetros e mecanismos envolvidos nos processos de atenuação natural de potenciais contaminantes na zona vadosa.

O IAN foi proposto para modificar o parâmetro O_s (camada de solo) do método COP (VIAS *et al.*, 2006), originalmente criado para países de clima temperado, já que sua aplicação direta em países de clima tropical pode levar a resultados não condizentes com as características físicas e químicas dos solos deste clima. Nesse sentido, a proposta do IAN levou em consideração os principais parâmetros da camada de solo (O_s) que promovem a proteção do aquífero cárstico em estudo.

Conforme já apontado por Sousa *et al.*, (2013), o tempo que um potencial contaminante leva para atravessar a zona vadosa, desde a superfície até ao aquífero, é de fundamental importância. Vale a pena ressaltar que esse tempo é função direta das propriedades físicas e químicas do solo.

Figura 6.1 - Síntese dos processos que atenuam potenciais contaminantes nos solos tropicais e formas de infiltração em áreas cársticas.



As características físico-químicas do solo que compõem a zona vadosa têm um importante papel nos processos de atenuação natural de potenciais contaminantes. Em virtude da gênese dessa camada, na metodologia adotada para o cálculo do IAN a espessura, juntamente com a condutividade hidráulica, forma um par de parâmetros que implicam no tempo de residência de potenciais contaminantes, ou seja, a real condição de um potencial contaminante atingir a zona saturada.

A mineralogia representada pela relação caulinita/óxidos, juntamente com o pH, está relacionada com as reações que afetam a atenuação no que diz respeito à velocidade de infiltração representada pela condutividade hidráulica. Esta, em conjunto com a espessura do solo, são as variáveis de maior peso no IAN.

Em geral, solos de textura mais argilosa possuem uma CTC maior e, como na área estudada há uma homogeneidade textural na classe argilosa, a mineralogia representada pela relação caulinita/óxidos teve, em virtude das características pedológicas do carste da área de Lagoa Santa (presença de argilominerais 1:1 e óxidos), um peso maior no índice. Este parâmetro já denota uma diferença importante em relação

ao carste europeu mediterrâneo pouco espesso e com presença de argilominerais 2:1 e o carste tropical, muito espesso e com presença de argilominerais 1:1.

Como o IAN é composto de diferentes parâmetros do solo, estes precisaram ser normalizados devido a diferentes unidades dos parâmetros analisados. Para isso, foi adotada uma escala de 10-100%. Já os pesos, refletem a importância de cada parâmetro em relação à atenuação natural de potenciais contaminantes no IAN.

Na tabela 6.1 são apresentados os valores de normalização e pesos adotados para o IAN.

Tabela 6.1 - Valores fundamentais para normalização e pesos para as variáveis do IAN.

Parâmetro	Peso (P)	Fator de Normalização (FN) %				
		100	75	50	25	10
Espessura (m)	5	> 30,00	15,00 - 30,00	5,00 - 15,00	1,00 - 5,00	< 1,00
% Argila	4	100,00 - 75,00	75,00 - 50,00	50,00 - 25,00	25,00 - 10,00	< 10,00
CTC (mmol _c /dm ³)	2	> 150,00	86,10 - 150,00	43,10 - 86,00	16,10 - 43,00	< 16,00
CO (%)	3	> 2,00	2,00 - 1,50	1,50 - 1,00	1,00 - 0,74	< 0,74
pH	2	6,0-7,0	7,0-8,5	5,5-6,0	5,5-4,5	< 4,5
K (cm/s)	4	< 10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	> 10 ⁻²
Rel Caul/Ox	5	>30,00	30,00-15,00	5,00-15,00	1,00-5,00	< 1,00

A CTC foi normalizada tomando como base os Dados da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5^a Aproximação (1999). Este foi o único estudo encontrado para o estado de Minas Gerais que faz menção ao parâmetro CTC no que diz respeito ao que é considerado uma escala de grandeza para se ter uma ideia de retenção de potenciais contaminantes catiônicos no solo.

A velocidade com que a água de chuva se infiltra, carreando potenciais contaminantes dissolvidos, faz com que este parâmetro esteja diretamente relacionado ao tempo de residência dos potenciais contaminantes e desenvolvendo um papel na atenuação natural mais importante que a CTC. Por essa razão, considerou-se o parâmetro condutividade hidráulica com um peso maior que a CTC.

O pH afeta a mobilidade de potenciais contaminantes no solo, influenciando diretamente as reações de decomposição bioquímica, as solubilidades e as sorções pelos colóides. Por isso, o pH é um fator importante para prever a possibilidade de um dado contaminante poluir a água subterrânea, a água superficial e a cadeia alimentar

(BRADY e WEIL, 2013). Porém, para os solos tropicais da área estudada, este parâmetro desempenha um papel fraco na atenuação de potenciais contaminantes, haja vista que os solos tropicais apresentam um pH ácido, que pouco influencia os processos de atenuação natural.

Em meio ácido, o pH do solo diminui a CTC e, como na área de estudo a CTC já é desfavorecida pela presença exclusiva de argilomineral 1:1, o parâmetro pH teve seu peso minimizado e com o mesmo valor que a CTC (Tabela 6.1).

A matéria orgânica contribui diretamente para a CTC, fornecendo cargas negativas para solução do solo, por isso possui peso maior do que o pH (Tabela 6.1). Ademais, a matéria orgânica contribui em vários outros processos físico-químicos do solo, como por exemplo na formação de agregados. O parâmetro carbono orgânico foi normalizado tomando como base sua forte relação com a CTC, especialmente quando a quantidade de matéria orgânica no solo é superior a 2%. Quando abaixo disso, ele é influenciado pela quantidade de argila. Por não haver um parâmetro de referência para CO em solos tropicais, o valor de 2% foi levado em consideração como valor de corte.

A normalização da condutividade levou em conta que maiores valores de condutividade aumentam a possibilidade de infiltração de potenciais contaminantes atingirem a zona saturada. Dessa forma, valores maiores de condutividade significaram menores valores de normalização. É importante ressaltar que essa variável forma par com a espessura do solo que afeta o tempo de residência de potenciais contaminantes de sofrerem atenuação natural.

A espessura da camada da zona vadosa (solo e rocha) foi determinada conforme item 5.3 já apresentado anteriormente.

O método COP não leva em consideração a zona saturada (ZWAHLEN, 2004). Então, quanto menor a espessura da zona vadosa, maior a probabilidade de a zona saturada ser contaminada. Foi elaborada uma simulação com dados de entrada de água nas fraturas, denominada “sem N.E.” e “com N.E.”, observados nos poços para coberturas com mais de 30% de argila, conforme apresentado na Tabela 6.2. Constatou-se que levar em consideração o N.E. é mais restritivo do que a profundidade de entrada d’água, haja vista que na área de estudo vários poços possuem entrada d’água mais profunda que o N.E. devido a confinamentos e semi-confinamentos (SOUZA, 2019).

O método original, apresentou classificações de proteção muito altas, exceto para espessuras de material inconsolidado menor ou igual a 2,68 m (espessura mínima que confere alta proteção) para ambas simulações. Já o método COP-Solo proposto,

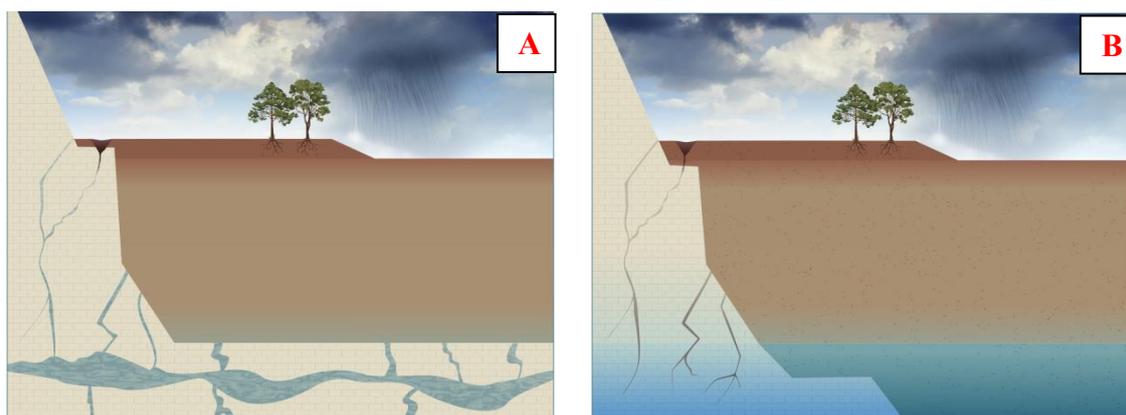
para o mesmo ponto, apresentou significativas alterações para as diferentes espessuras consideradas. Como a espessura da zona vadosa é a que promove maior atenuação, considerou-se plausível a utilização do N.E. em detrimento da profundidade de entrada d'água nas fraturas.

Tabela 6.2 - Simulação para escolha do método mais apropriado para definição da espessura da zona vadosa.

Ponto	O Value Original (solo e rocha não saturada)						O Value Modificado (Somente solo e zona de alteração)					
	Com N.E.			Sem N.E.			Com N.E.			Sem N.E.		
	Espessura (m)	Fator O	Classificação	Espessura (m)	Fator O	Classificação	Espessura (m)	Fator O (%)	Classificação	Espessura (m)	Fator O (%)	Classificação
3	17,50	9	Muito Alta	30,30	10	Muito Alta	4,00	18,18	Baixa	4,00	18,18	Baixa
								80	Moderada		80	Moderada
								1,82	Alta		1,82	Alta
4	21,36	10	Muito Alta	58,00	10	Muito Alta	21,36	94,55	Moderada	58,00	60,00	Moderada
								5,45	Alta		38,38	Alta
								-	-		1,82	Muito Alta
6	20,25	10	Muito Alta	58,00	10	Muito Alta	20,25	94,55	Moderada	58,00	61,82	Moderada
								5,45	Alta		36,36	Alta
								-	-		1,82	Muito Alta
8	11,20	10	Muito Alta	60,00	10	Muito Alta	11,20	3,63	Baixa	60,00	61,82	Moderada
								92,74	Moderada		36,36	Alta
								3,63	Alta		1,82	Muito Alta
9	35,70	10	Muito Alta	53,80	10	Muito Alta	35,70	61,82	Moderada	53,80	61,82	Moderada
								36,36	Alta		36,36	Alta
								1,82	Muito Alta		1,82	Muito Alta
10	9,19	10	Muito Alta	20,60	10	Muito Alta	9,19	3,63	Baixa	20,60	94,55	Moderada
								92,74	Moderada		5,45	Alta
								3,63	Alta		-	-
11	17,90	10	Muito Alta	41,91	10	Muito Alta	17,90	94,55	Moderada	41,91	61,82	Moderada
								5,45	Alta		36,36	Alta
								-	-		1,82	Muito Alta
12	1,66	7	Alta	29,00	10	Muito Alta	1,66	18,18	Baixa	12,00	96,36	Moderada
								80	Moderada		1,82	Baixa
								1,82	Alta		1,82	Alta

Como o carste da área de estudo possui espessura de zona vadosa com presença do epicarste (Figura 6.2 A), bem como sem a presença do epicarste (Figura 6.2 B). Nesta última situação, que é recorrente na área de estudo, contendo somente material inconsolidado e muito espesso, por que levar em consideração espessuras pouco representativas como as propostas no fator de normalização do método COP-Solo? A resposta encontra-se na aplicação do método COP-Solo também ao carste tropical brasileiro situado em região de clima semiárido, o qual apresenta pequenas espessuras de solo, conforme explicitado por Nossa (2011), se comparado à área de estudo.

Figura 6.2 - Diferentes situações de zona vadosa encontradas na área estudada.



Na área de estudo há registros de N.E. menos profundos. No entanto, no carste tropical localizado no semiárido brasileiro, as espessuras comuns encontradas são entre 1,0 – 4,0 m, e raramente superiores a 5,0 m, exceto nos Latossolos (NOSSA, 2011). Por essa razão, essa faixa de menor espessura de solo entrou no fator de normalização da área de estudo. As demais faixas se aproximam bem da realidade local.

Os parâmetros utilizados no IAN foram combinados de acordo com a equação:

$$IAN = \frac{\sum(P \times FN)}{\sum P}, \text{ onde:}$$

P = peso assumido por cada parâmetro (2-5);

FN = valor assumido por cada parâmetro após normalização (10-100%).

Foram estabelecidas notas hierárquicas para o IAN. As notas entre 0 e 20 correspondem a solos com as seguintes características: muito baixa de retenção de potenciais contaminantes e para tal foi dado o valor de 1; entre 20 e 40 - baixa retenção

de contaminantes dado o valor de 2; 40 e 60, moderada retenção, dado um valor de 3; entre 60 e 80, alta capacidade de retenção, dado o valor de 4; e, finalmente notas de 80 a 100, dado o valor de 5 para uma capacidade de retenção de potenciais contaminantes muito alta.

Na Tabela 6.3 são apresentados os valores dos parâmetros analisados na área estudada.

Tabela 6.3 - Valores dos parâmetros analisados na área de estudo para construção do IAN.

Ponto	Espessura	% Argila	CTC (mmolc/dm ³)	CO	pH	K (cm/s)	Rel Caul/Ox
3	21,08	84,20	77,00	1,82	4,30	1,40x10 ⁻³	2,67
4	2,98	72,30	79,30	1,33	4,90	1,40x10 ⁻³	4,06
5	36,57	79,20	116,50	1,82	4,00	1,53x10 ⁻³	0,82
18	26,58	83,00	119,40	1,62	4,00	1,40x10 ⁻³	1,18
19	21,22	75,70	71,20	1,21	4,10	6,29x10 ⁻⁴	1,28
20	20,19	71,40	101,50	1,57	3,90	1,40x10 ⁻³	13,49
30	86,66	88,20	107,00	3,81	4,20	1,40x10 ⁻³	2,80
31	0,52	76,00	96,80	1,40	5,80	1,16x10 ⁻³	3,25
37	6,57	67,10	75,60	1,40	4,10	1,40x10 ⁻³	4,75
38	41,23	72,00	96,70	1,24	3,90	1,40x10 ⁻³	9,55
42	26,19	66,20	71,8	1,05	4,20	1,16x10 ⁻³	3,15
44	36,12	86,80	94,80	2,22	4,20	1,40x10 ⁻³	1,56
47	17,09	75,40	127,40	2,90	3,90	1,40x10 ⁻³	3,58
48	35,38	54,50	74,40	< 0,740	4,00	2,76x10 ⁻⁴	7,21
49	24,96	79,50	114,90	1,96	4,00	1,40x10 ⁻³	1,81
51	36,80	50,90	104,80	1,60	3,60	2,77x10 ⁻⁴	7,96
52	41,70	88,70	75,20	1,52	4,20	1,40x10 ⁻³	1,27
53	0,52	77,60	121,80	3,2	4,10	1,40x10 ⁻³	1,98
54	12,97	45,60	97,00	2,00	5,60	6,34x10 ⁻⁵	37,22
55	6,45	75,60	102,90	3,51	4,30	1,40x10 ⁻³	1,85
56	28,21	79,20	185,30	1,80	6,70	1,40x10 ⁻³	1,31
58	9,37	64,00	94,50	1,52	3,90	1,40x10 ⁻³	1,88
60	32,70	85,90	103,80	2,04	4,20	1,40x10 ⁻³	3,07

A Tabela 6.4 apresenta os valores normalizados dos parâmetros do solo de acordo com os valores adotados para construção do IAN apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.4 - Valores normalizados dos parâmetros analisados na área de estudo para construção do IAN.

Ponto	Espessura	% Argila	CTC (mmolc/dm ³)	CO	pH	K (cm/s)	Rel Caul/Ox
3	75	100,00	50,00	75,00	10,00	25	25,00
4	25	75,00	50,00	50,00	25,00	25	25,00
5	100	100,00	75,00	75,00	10,00	25	10,00
18	75	100,00	75,00	75,00	10,00	25	25,00
19	75	100,00	50,00	50,00	10,00	50	25,00
20	75	75,00	75,00	75,00	10,00	25	50,00
30	100	100,00	75,00	100,00	10,00	25	25,00
31	10	100,00	75,00	50,00	25,00	25	25,00
37	25	75,00	50,00	50,00	10,00	25	25,00
38	100	75,00	75,00	50,00	10,00	25	50,00
42	75	75,00	50,00	50,00	10,00	25	25,00
44	100	100,00	75,00	100,00	10,00	25	25,00
47	75	100,00	75,00	100,00	10,00	25	25,00
48	100	75,00	50,00	10,00	10,00	50	50,00
49	75	100,00	75,00	75,00	10,00	25	25,00
51	100	75,00	75,00	75,00	10,00	50	50,00
52	100	100,00	50,00	75,00	10,00	25	25,00
53	10	100,00	75,00	100,00	10,00	25	25,00
54	50	50,00	75,00	100,00	50,00	75	100,00
55	50	100,00	75,00	100,00	10,00	25	25,00
56	75	100,00	100,00	75,00	100,00	25	25,00
58	50	75,00	75,00	75,00	10,00	25	25,00
60	100	100,00	75,00	100,00	10,00	25	25,00

Na Tabela 6.5 são apresentados os valores do IAN calculado.

Tabela 6.5 - Valores do IAN calculados.

Ponto	Espessura	% Argila	CTC (mmolc/dm ³)	CO	pH	K (cm/s)	Rel Caul/Ox	Σ	IAN
3	375	400	100	225	20	100	125	1345	53,80
4	125	300	100	150	50	100	125	950	38,00
5	500	400	150	225	20	100	50	1445	57,80
18	375	400	150	225	20	100	125	1395	55,80
19	375	400	100	150	20	200	125	1370	54,80
20	375	300	150	225	20	100	250	1420	56,80
30	500	400	150	300	20	100	125	1595	63,80
31	50	400	150	150	50	100	125	1025	41,00
37	125	300	100	150	20	100	125	920	36,80
38	500	300	150	150	20	100	250	1470	58,80
42	375	300	100	150	20	100	125	1170	46,80
44	500	400	150	300	20	100	125	1595	63,80
47	375	400	150	300	20	100	125	1470	58,80
48	500	300	100	30	20	200	250	1400	56,00
49	375	400	150	225	20	100	125	1395	55,80
51	500	300	150	225	20	200	250	1645	65,80
52	500	400	100	225	20	100	125	1470	58,80
53	50	400	150	300	20	100	125	1145	45,80
54	250	200	150	300	100	300	500	1800	72,00
55	250	400	150	300	20	100	125	1345	53,80
56	375	400	200	225	200	100	125	1625	65,00
58	250	300	150	225	20	100	125	1170	46,80
60	500	400	150	300	20	100	125	1595	63,80

6.1. Análise estatística para aplicação dos parâmetros analisados no IAN

6.1.1. Dendrograma

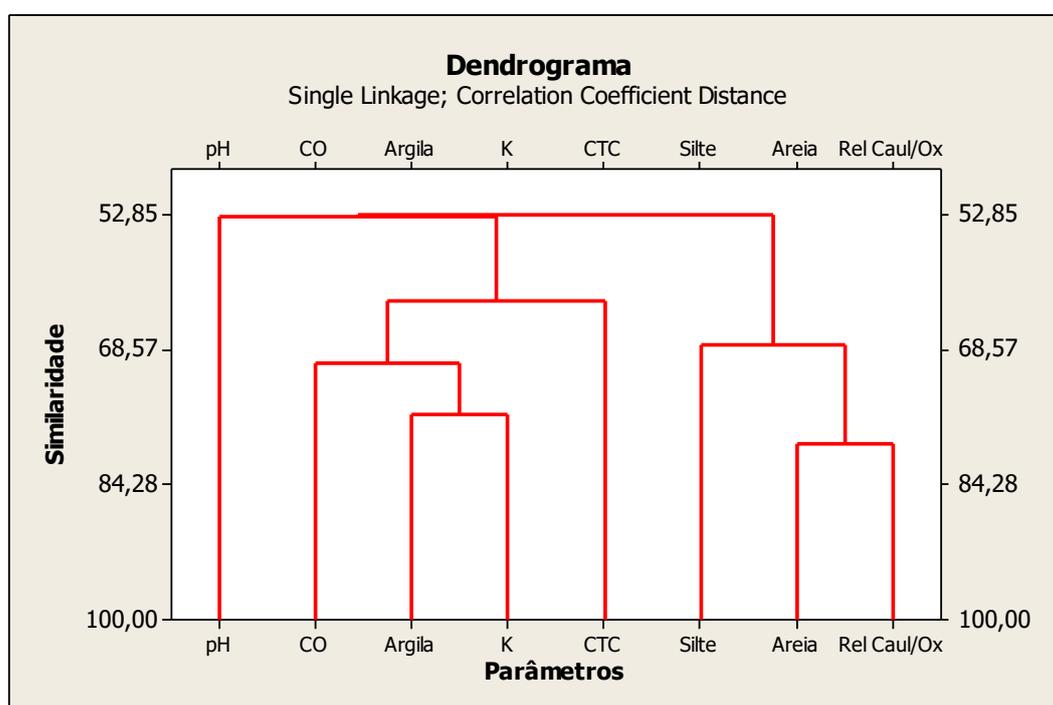
O Dendrograma é uma ferramenta estatística que representa graficamente os resultados de forma hierárquica, onde cada variável é representada como um agrupamento separado, mostrando graficamente como esses agrupamentos são combinados até que todos estejam contidos em um único agrupamento (HAIR, 2009).

A análise de Dendrograma a seguir foi realizada no *software Minitab* da empresa *Minitab Inc.* versão 16.1.0.0. Os resultados são apresentados pela Tabela 6.6 e Figura 6.3, a seguir.

Tabela 6.6 - Resultados estatísticos das análises de solo, Dendrograma.

Step	Number of clusters	Similarity level	Distance level	Clusters joined	New cluster	Number of obs. in new cluster
1	7	79,6008	0,407985	7	8	7
2	6	76,1439	0,477122	4	6	4
3	5	70,2896	0,594208	2	4	2
4	4	67,9814	0,640372	5	7	5
5	3	63,0444	0,739112	2	3	2
6	2	53,1743	0,936513	1	2	1
7	1	52,8499	0,943003	1	5	1

Figura 6.3 - Análise estatística de similaridade das variáveis utilizadas para composição do IAN.



Verificou-se maior similaridade entre areia e relação caulinita-óxidos 79,6%, seguida da porcentagem de argila com a condutividade hidráulica com 76,1% de similaridade (por essa razão no IAN esses dois parâmetros têm o mesmo peso), e entre esta e o carbono orgânico com 70,2%. Como apresentado pela literatura no item 6.4, quanto menor o tamanho do grão, menor a condutividade hidráulica, porém na área de estudo as diferenças de condutividade hidráulica não se explicam somente pela textura (que é argilosa), mas pela relação caulinita-óxidos, conforme discutido no item 8.2.

Para a condutividade hidráulica, as quantidades de areia e silte presente nas amostras analisadas, são as granulometrias que mais afetam a mesma, o que mostra que mesmo na homogeneidade das amostras apresentadas no triângulo textural essas desempenham um papel mais significativo para essas texturas, areia com 69,6%, seguido de silte com 66,6%, o que também está de acordo com a teoria apresentada. Ressalta-se que, na análise estatística, as correlações apresentadas, determinam apenas uma correlação estatística entre as variáveis, onde os resultados devem ser suportados pelo conhecimento teórico que correlaciona tais variáveis. Parece estranho que o pH esteja estatisticamente correlacionado com as variáveis areia, silte e condutividade. Estatisticamente podemos correlacionar qualquer coisa, mas temos que levar em consideração aquilo que faz sentido de acordo com o conhecimento do problema que se está estudando. Dessa forma, a variável pH na análise do Dendograma, tem realmente influência nos processos de infiltração e conseqüentemente na atenuação natural, afetando a porosidade, conforme discutido no item 8.2, por meio do processo de adsorção na superfície da caulinita entre óxidos e hidróxidos, afetando a atenuação natural de potenciais contaminantes em subsuperfície. Mesmo assim, tem peso reduzido em relação às demais variáveis no IAN por ser importante somente em solos argilosos onde o principal argilomineral seja a caulinita.

A similaridade entre carbono orgânico e argila (70,3%) com a CTC (63,0%) está perfeitamente de acordo com a teoria apresentada para correlação desses parâmetros, ou seja, quanto maior porcentagem de argila e carbono orgânico maior as cargas negativas presente no solo e, em consequência maior será a adsorção de potenciais contaminantes catiônicos.

6.1.2. Análise de Componente Principal – PCA

Como a matriz de dados principais contém unidades e grandezas muito diferentes, primeiramente foi realizada uma padronização desses dados, tornando-os adimensionais. Para isso foi utilizada a média aritmética e o desvio padrão de cada uma das variáveis.

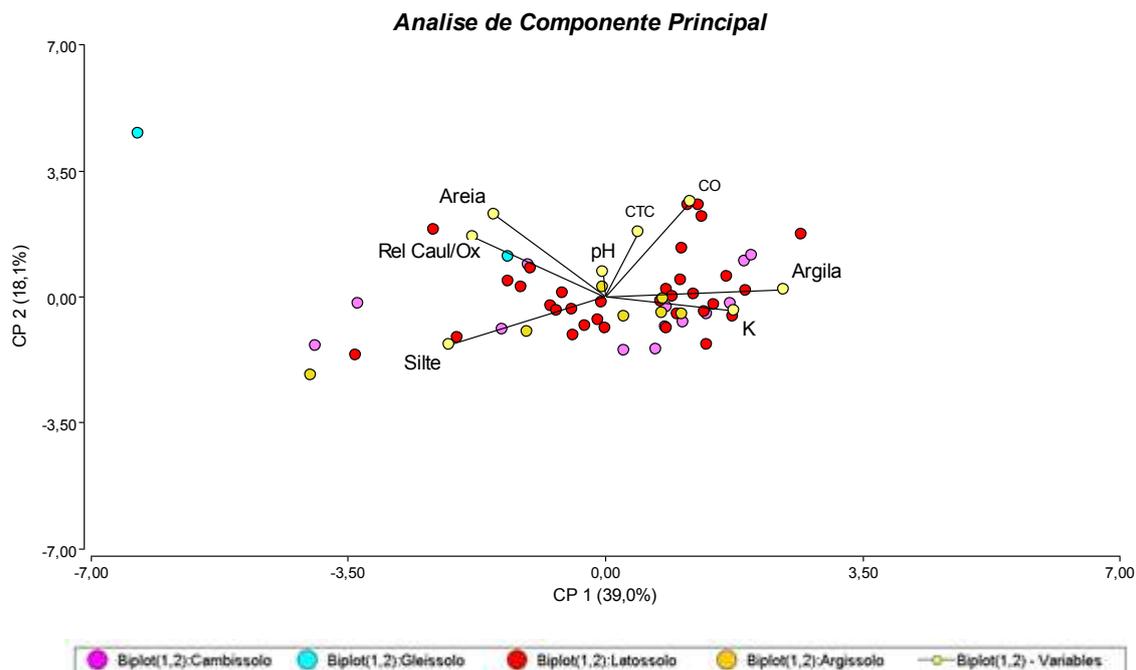
A Análise de Componente Principal mostra que os três primeiros componentes explicam 72,0% dos dados analisados (Tabela 6.7 e Figura 6.4). A Análise de Componentes Principais foi realizada no *software Infostat*, licenciado para a *Facultad de Agronomía da Universidad de Buenos Aires* onde parte da tese foi realizada.

Tabela 6.7 - Análise de Componente Principal para pH, CO, CTC, Argila, Silte, Condutividade Hidráulica e Relação Caulinita-Óxidos.

Eigenanalysis of the Correlation Matrix								
Eigenvalue	3,1215	1,4472	1,1882	0,8080	0,6421	0,4157	0,3774	0,0000
Proportion	0,390	0,181	0,149	0,101	0,080	0,052	0,047	0,000
Cumulative	0,390	0,571	0,720	0,821	0,901	0,953	1,000	1,000
Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
pH	0,008	-0,153	-0,726	-0,590	-0,273	0,152	0,066	0,000
CO	-0,255	-0,579	-0,063	0,098	0,537	0,274	0,473	-0,000
CTC	-0,100	-0,393	0,545	-0,660	0,036	-0,166	-0,271	-0,000
Argila	-0,536	-0,046	-0,160	0,117	-0,047	-0,352	-0,133	0,726
Silte	0,470	0,293	0,168	-0,284	0,210	0,202	0,337	0,621
K	-0,387	0,086	0,342	-0,021	-0,630	0,318	0,477	-0,000
Areia	0,332	-0,506	0,039	0,311	-0,329	0,442	-0,382	0,294
Rel Caul/ox	0,397	-0,369	-0,002	0,122	-0,291	-0,643	0,440	-0,000

Os autovalores (*Eigenvalue*), representam os percentuais da quantidade de variância total que estão associados ao componente. O primeiro autovalor representa o maior percentual da variabilidade máxima, o segundo valor e assim por diante.

Figura 6.4 - Análise do comportamento dos diferentes tipos de solos em relação aos parâmetros analisados para o IAN.



O resultado mostra uma intrínseca relação entre Latossolos e Cambissolos na área estudada. Segundo Ker (1997), os Cambissolos são solos pouco evoluídos quando comparados aos Latossolos, porém às vezes conforme citado por Santos *et al.*, (2018) alguns solos dessa classe possuem características similares às dos solos da classe Latossolos, o que se pode observar nos solos da área de estudo, conforme mostrado na Figura 6.4 apresentada anteriormente.

A condutividade hidráulica tem componente oposto à relação caulinita/óxidos e tem correlação com a porcentagem de argila e CO.

7. CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO COP-Solo PROPOSTO

Esta tese tem o objetivo de propor o método COP-Solo, levando em consideração o “Fator O”, onde as reais condições tropicais que recobrem o carste da região de Lagoa Santa poderão também ser utilizadas em outros ambientes cársticos tropicais.

Como a atenuação de potenciais contaminantes se dá na zona vadosa, mais especificadamente na camada de solo, o método COP-Solo propõe a utilização do IAN em substituição ao fator O_s . Assim, além de levar em consideração os parâmetros físicos contidos no método original (textura e espessura de solo) há o incremento de parâmetros químicos e mineralógicos que se aproximam das condições tropicais que, devido às características climáticas, são enormemente diferentes dos solos europeus e mediterrâneos. Levando em consideração que os métodos serão comparados, foi elaborada a Tabela 7.1 de equivalência adaptativa do IAN ao O_s para que não ocorram discrepâncias dos valores dados ao método original e o método COP-Solo.

Tabela 7.1 - Equivalência de valores dados ao IAN comparados com os valores O_s .

IAN		O_s Valores Método Original
Nota	Valores Método Modificado	
0,0 - 20,0	1	1
20,0 - 40,0	2	2
40,0 - 60,0	3	3
60,0 - 80,0	4	4
80,0 - 100,0	5	5

Para o cálculo do subfator O_L , nos casos em que não há existência de rocha ($l_y = 0$) na zona vadosa, foi preciso também modificar o subfator O_L . Nesse caso, para o cálculo do IAN, a espessura total a ser levada em consideração no método COP-Solo será a espessura da camada inconsolidada até a superfície da zona vadosa e deverá ser levada em consideração a Tabela 7.2 de “Score” equivalente para o fator O COP-Solo. Nos casos em que há a ocorrência de rocha na zona vadosa, o valor de l_y aplicado ao método modificado será calculado similarmente ao método original.

Tabela 7.2 - Equivalência de valores dados ao score do fator O original e COP-Solo.

Original O Score		COP-Solo O Score	
Score	Classificação de Proteção	Score	Classificação de Proteção
1	Muito baixa	1	Muito baixa
2	Baixa	2	Baixa
(2 -4]	Moderado	(2 -4]	Moderado
(4 - 8]	Alto	(4 - 5]	Alto
(8 - 15]	Muito Alto	(5 - 7]	Muito Alto

Com as modificações propostas em relação ao método original, pode-se obter valores similares, propiciando desta maneira a comparação entre eles.

Os valores apresentados na Tabela 7.3 demonstram, como exemplo prático para verificação da aderência à hipótese apresentada, uma simulação do pior cenário entre os métodos (situação de maior vulnerabilidade-menor proteção) propiciada pela camada protetora do aquífero da área estudada, onde foi verificado que há diferenças significativas de proteção, mesmo não havendo diferenciação textural da camada protetora do aquífero. Para tal, foi considerada a mesma espessura, 0,40 m de solo argiloso e espessura de rocha cárstica menor ou igual a 250,0 m, nos cálculos do O Score para ambos os métodos.

Tabela 7.3 - Comparação entre os resultados dos métodos COP Original e COP-Solo para o cenário de maior vulnerabilidade da camada protetora do aquífero.

Original O Value				
% argila	Textura	Espessura (m)	I_y	Classificação de Proteção O score
> 30%	Argilosa	< 0,50	1	Moderada a Alta
COP-Solo O Value				
% argila	Textura	Espessura (m)	I_y	Classificação de Proteção O score
>30%	Argilosa	< 1,00	0	Baixa a Moderada

Conforme resumo apresentado a seguir na Tabela 7.4, Vías *et al.*, (2010) comparou os resultados da aplicação do método COP em diferentes regiões cársticas europeias. O resultado que mais demonstra a pouca importância da cobertura dos solos na proteção dos aquíferos cársticos europeus são os resultados apresentados para os aquíferos de Sierra de Líbar (Espanha-Foto 7.3) e Bauschlotter (Alemanha), ambos com a mesma espessura de solo, 0,3 a 1,0 m. O primeiro possui uma descrição de solo que é pouco espesso ou ausente e o segundo que são constituídos por sedimentos do

quaternário e aluvião que, em geral, possuem uma permeabilidade e uma condutividade hidráulica muito maior que qualquer outra textura. Esse estudo confirmou que a camada de rocha na zona vadosa desempenha um papel preponderante na proteção do carste europeu, muito maior do que a camada de solos, e por isso não se observa $l_y = 0$ (é mais comum haver rocha do que solo na zona vadosa, raro de ocorrer no carste tropical da área de estudo) no método original, levando muitas vezes a um cálculo incorreto do fator “O” quando calculado para o carste tropical.

A proteção conferida ao aquífero cárstico europeu tem uma forte dependência da espessura, litologia e grau de fraturamento das rochas na zona vadosa, bem como do desenvolvimento de feições cársticas no epicarste, que reflete, obviamente na maior ou menor proteção do aquífero. Conforme observado, a vulnerabilidade do aquífero de Sierra de Líbar é maior comparada ao aquífero de Bauschlotter, demonstrando que não é a camada de solo que promove a proteção e sim o grau de fraturamento e desenvolvimento do carste que é maior no aquífero espanhol do que no aquífero alemão. A seguir as Fotos 7.1 e 7.4 a seguir mostram as áreas cársticas do sul da Espanha, onde foram desenvolvidos os testes comparativos da metodologia COP entre diferentes países europeus.

Tabela 7.4 - Comparação de resultados do método COP em diferentes países europeus.

Aquífero									
Sierra de Libar (Espanha)					Sierra de Mijas (Sul da Espanha)				
Área (km ²)	Precipitação média/ano (mm)	Geologia/Espessura (m)	Solos/Espessura (m)	Vulnerabilidade	Área (km ²)	Precipitação média/ano (mm)	Geologia/Espessura (m)	Solos/Espessura (m)	Vulnerabilidade
90	1500	Dolomitos jurássicos, recobertos por calcários e margas cretácicas/>400. Calcários fraturados na direção preferencial N40E.	Pouco espessos ou ausentes/0,3-1,0	Muito Alta - Alta	100	600	Margas triásicas muito fraturadas sobrejacentes a metapelitos paleozóicos./>600. Os falhamentos na direção ESE-WNW. Feições cársticas escassas	Os solos recobrem as margas/ 0,70-1,00	Baixa - Muito Alta
Aquífero									
Bauschlotter (Alemanha)					Podstenjek (Slovênia)				
Área (km ²)	Precipitação média/ano (mm)	Geologia/Espessura (m)	Solos/Espessura (m)	Vulnerabilidade	Área (km ²)	Precipitação média/ano (mm)	Geologia/Espessura (m)	Solos/Espessura (m)	Vulnerabilidade
135	800-1300	Rochas sedimentares triásicas, formadas por calcários, margas e dolomitos, com baixa a moderada carsrtificação. Poucas feições cársticas são desenvolvidas na superfície e sistemas de cavernas não são conhecidos na área.	Sedimentos quaternários, aluviais e solos recobrem as rochas triásicas/0,3-1,0	Moderada - Baixa	9	1500-1600	Calcários carstificados paleocenos, cobertos por material detrítico eoceno.	Os calcários são recobertos em alguns trechos por Cambissolos (a deposição associados à dolinas e depressões)/~1,0m	Moderada - Muito Alta

Fonte: VIAS *et al.*, (2010).

Foto 7.1 - Sierra de Mijas, situada a oeste de Málaga. Área de recarga de Torremolinos.



Foto 7.2 - Surgências de Torremolinos.



Foto 7.3 - Sierra de Líbar, Sul da Espanha.



Foto 7.4 - Cueva del Gato, Sul da Espanha. Mostrando a ausência de solo.



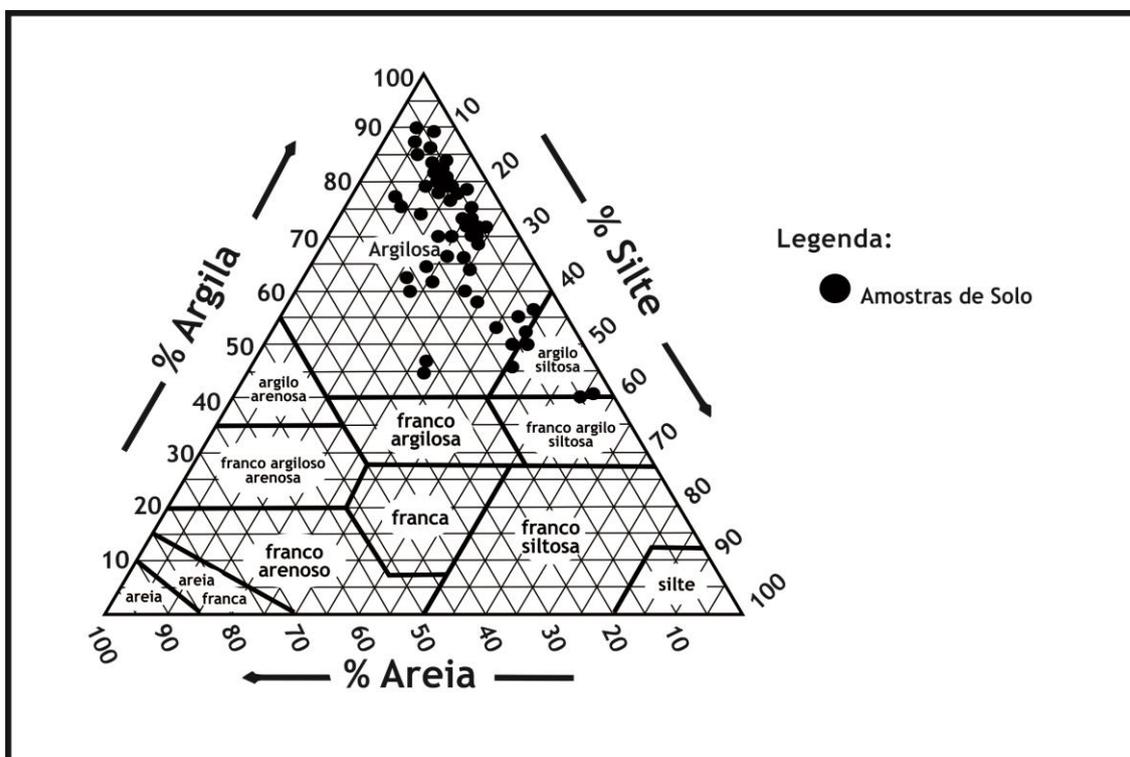
8. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

8.1. Solos

Caracterização física

O Diagrama Triangular para classificação do solo é uma técnica bastante conhecida e muito utilizada para a classificação textural do solo. Nele, se encontram as porcentagens de areia, silte e argila analisada no solo da área de estudo, conforme apresentado na Figura 8.1. A classificação é determinada em função da região em que se encontra o ponto de convergência dos valores apresentados pelo laboratório. O solo da área de estudo foi classificado como argiloso, um indicativo muito forte de sorção de potenciais contaminantes no solo e, conseqüentemente, mobilidade dos mesmos em subsuperfície. Em geral, este solo apresenta boa capacidade de retenção de potenciais contaminantes.

Figura 8.1 - Diagrama Triangular para definição de classe textural do solo da área de estudo.



Fonte: Modificado de USDA, (2017).

A relação silte/argila indica o estágio de intemperismo de solos em regiões tropicais, de modo que valores inferiores a 0,6 nos solos de textura argilosa e muito argilosa são indicativos de intemperismo mais acentuado (SANTOS *et al.*, 2018). A relação silte/argila, mostrada na Tabela 8.1, indica que na porção mais alta da área de estudo, com altitudes variando entre 780 m a 879 m, o solo sofre um intemperismo mais acentuado.

Tabela 8.1 - Relação silte/argila nas amostras coletadas na área de estudo.

Ponto	Relação Silte/Argila	Altitude (m)	Ponto	Relação Silte/Argila	Altitude (m)
1	0,31	722	31	0,26	879
2	0,23	671	32	0,14	799
3	0,11	740	33	0,10	695
4	0,26	727	34	0,16	764
5	0,21	806	35	0,17	728
6	1,36	780	36	0,27	684
7	0,16	750	37	0,28	724
8	0,13	710	38	0,26	699
9	0,65	720	39	0,26	709
10	0,81	692	40	0,08	751
11	0,32	656	41	0,15	746
12	0,26	671	42	0,33	807
14	0,17	706	44	0,07	833
15	0,18	677	45	0,15	878
16	0,17	711	46	0,13	758
17	0,14	718	47	0,21	747
18	0,13	751	48	0,67	734
19	0,21	738	49	0,18	721
20	0,29	751	51	0,75	774
21	0,14	852	52	0,04	816
23	0,33	695	53	0,07	780
24	0,43	652	54	0,57	713
25	0,51	690	55	0,10	821
26	0,34	673	56	0,13	826
27	0,32	696	57	0,1	839
28	0,24	706	58	0,38	754
29	0,11	788	60	0,06	855
30	0,08	799			

O solo é bem drenado e em virtude deste intemperismo maior, condicionando a lixiviação dos óxidos de ferro e de alumínio, o que pode ser observado nos valores de óxidos de hematita nas análises de DRX (Gráfico 8.2).

Na Tabela 8.2 são apresentados os resultados físico-químicos das amostras de solos analisadas pelos laboratórios.

Tabela 8.2 - Resultados das amostras de solos analisadas.

Ponto	pH			f _{oc} (%)	M.O. (g/dm ³)	CTC (mmolc/dm ³)	Textura (%)			
	CaCl ₂	KCl	H ₂ O				Argila	Silte	Areia Grossa	Areia Fina
1	4,90	3,90	4,90	1,21	18,00	91,10	72,00	22,50	3,00	2,50
2	6,20	5,00	6,20	2,06	28,00	97,00	70,30	16,40	7,30	6,00
3	5,20	4,30	5,20	1,82	23,00	77,00	84,20	9,00	4,40	2,50
4	5,90	4,90	5,90	1,33	19,00	79,30	72,30	18,70	5,40	3,60
5	4,90	4,00	4,90	1,82	27,00	116,50	79,20	16,40	2,10	2,30
6	4,90	3,90	4,90	<0,740	6,00	96,20	40,10	54,60	3,10	2,20
7	5,70	4,80	5,70	1,82	20,00	70,20	73,80	11,80	8,70	5,70
8	4,50	4,00	4,50	1,45	22,00	111,30	83,20	11,20	3,00	2,60
9	5,40	4,10	5,40	1,20	18,00	76,60	52,70	34,20	4,00	9,10
10	5,20	4,10	5,20	1,00	17,00	65,80	49,30	39,80	4,00	6,90
11	4,70	3,80	4,70	1,09	19,00	154,30	70,00	22,40	2,40	5,20
12	4,60	3,90	4,60	1,21	16,00	109,30	61,50	16,00	6,40	16,10
14	4,70	4,00	4,70	1,33	26,00	123,20	77,30	13,00	5,60	4,10
15	4,90	4,00	4,90	1,41	17,00	112,10	77,10	13,80	5,00	4,10
16	5,40	4,20	5,40	1,70	24,00	76,50	79,30	13,40	4,40	2,90
17	5,10	4,10	5,10	1,74	20,00	76,10	80,40	11,00	5,20	3,40
18	4,70	4,00	4,70	1,62	27,00	119,40	83,00	10,70	3,80	2,50
19	5,20	4,10	5,20	1,21	15,00	71,20	75,70	16,10	4,70	3,50
20	5,00	3,90	5,00	1,57	21,00	101,50	71,40	20,80	5,10	2,70
21	5,40	4,00	5,40	2,82	34,00	118,40	82,10	11,80	3,80	2,30
23	6,00	5,20	6,00	1,33	17,00	89,50	69,3	23,20	3,50	4,00
24	6,20	5,30	6,20	1,57	21,00	102,3	59,90	25,90	7,60	6,60
25	4,90	3,90	4,90	<0,740	12,00	113,60	57,60	29,30	6,40	6,70
26	4,40	3,90	4,40	1,56	25,00	101,30	60,50	20,50	4,70	14,30
27	4,80	3,90	4,80	1,05	15,00	122,50	70,50	22,30	2,10	5,10
28	5,70	4,60	5,70	2,22	30,00	106,20	75,00	17,80	3,60	3,60
29	5,50	4,10	5,50	2,98	36,00	105,8	84,80	9,40	3,20	2,70
30	5,30	4,20	5,30	3,81	37,00	107,00	88,20	6,80	2,60	2,40
31	6,90	5,80	6,90	1,40	23,00	96,80	76,00	19,40	2,30	2,30
32	6,20	5,20	6,20	1,28	19,00	65,10	81,20	11,00	4,10	3,70
33	5,10	4,10	5,10	2,08	25,00	89,00	81,40	8,50	6,00	4,10
34	5,60	4,60	5,60	0,81	11,00	70,80	80,00	12,80	3,50	3,70
35	4,40	3,90	4,40	1,66	26,00	120,00	77,80	13,10	2,90	6,20
36	4,40	3,90	4,40	1,33	18,00	118,50	65,10	17,60	3,00	14,40
37	5,30	4,10	5,30	1,40	20,00	75,60	67,10	18,80	3,30	10,70
38	4,90	3,90	4,90	1,24	17,00	96,70	72,00	18,90	4,40	4,70
39	5,20	4,00	5,20	1,40	18,00	109,60	70,40	18,20	5,10	6,30
40	5,50	4,40	5,50	1,57	21,00	96,80	86,40	6,70	4,40	2,50
41	5,80	4,60	5,80	1,16	16,00	78,30	80,10	11,80	4,70	3,40
42	5,30	4,20	5,30	1,05	18,00	71,8	66,20	21,80	6,10	5,80
44	5,00	4,20	5,00	2,22	30,00	94,80	86,80	6,50	3,90	2,80

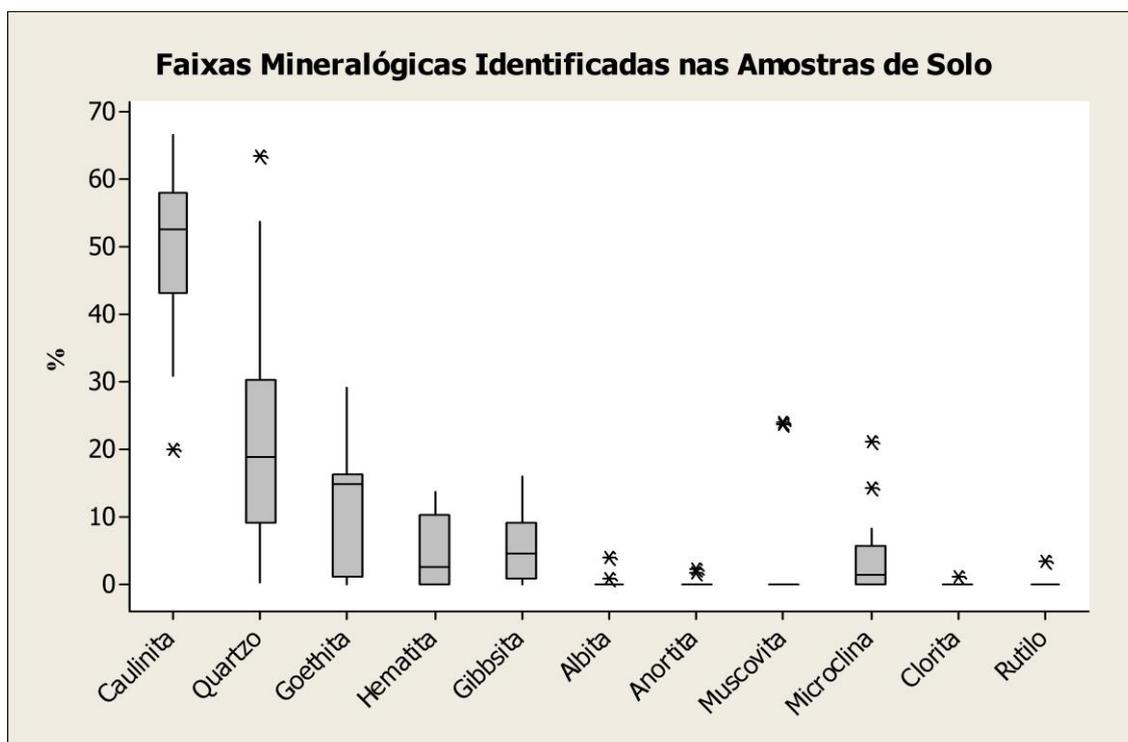
45	6,10	5,00	6,10	1,60	22,00	99,50	80,80	12,20	4,30	2,70
46	5,10	4,20	5,10	1,16	19,00	105,10	81,50	10,30	4,80	3,40
47	4,80	3,90	4,80	2,90	28,00	127,40	75,40	15,60	5,10	3,90
48	5,10	4,00	5,10	< 0,74	12,00	74,40	54,50	36,60	4,90	4,00
49	5,10	4,00	5,10	1,96	28,00	114,90	79,50	14,00	3,90	2,60
51	4,80	3,60	4,80	1,60	25,00	104,80	50,90	38,00	5,30	5,80
52	5,30	4,20	5,30	1,52	23,00	75,20	88,70	3,90	4,80	2,60
53	4,90	4,10	4,90	3,2	34,00	121,80	77,60	5,80	7,80	8,80
54	6,50	5,60	6,50	2,00	29,00	97,00	45,60	26,00	14,20	14,20
55	5,30	4,30	5,30	3,51	38,00	102,90	75,60	7,80	9,90	6,70
56	7,40	6,70	7,40	1,80	27,00	185,30	79,20	10,30	7,20	3,30
57	5,70	4,30	5,70	1,32	19,00	53,10	86,30	8,20	3,50	2,00
58	5,30	3,90	5,30	1,52	23,00	94,50	64,00	24,10	6,90	5,00
60	5,10	4,20	5,10	2,04	29,00	103,80	85,90	5,30	4,90	3,90

As análises de DRX mostram uma predominância de minerais caulinita e óxidos na fração argila, indícios de solos altamente intemperizados, conforme já observado anteriormente, e possivelmente oriundos de sedimentos recentes retrabalhados.

A CTC é diretamente proporcional a matéria orgânica e da quantidade de argila presente no solo. Quando este valor é menor que 2,0% CO, há uma grande variabilidade e essa correlação se torna inexistente (ESSINGTON, 2005). Devido a isto, que para textura foi adotado um peso menor no índice de atenuação em comparação à espessura do solo. A espessura, como está diretamente relacionada ao tempo de residência de potenciais contaminantes no solo, tem o mesmo peso da condutividade hidráulica na determinação do IAN, pois ambos vão influenciar o tempo de residência.

Os resultados de análise de DRX, no Gráfico 8.2, apresentam como principal mineral de argila a caulinita, mineral este que apresenta menor CTC dentre os minerais de argila. A caulinita possui uma dependência alta do pH quanto à CTC, conforme apontado por MERCKEL e PLANER-FRIEDRICH, (2008). Nesse sentido, a textura argilosa apresentada pela área é importante no quesito infiltração de potenciais contaminantes aliada à espessura, e pouco representativa, em relação aos outros parâmetros, na atenuação de potenciais contaminantes.

Gráfico 8.2 - Gráfico dos resultados das amostras de solo submetidas à Difração de Raios X (DRX).

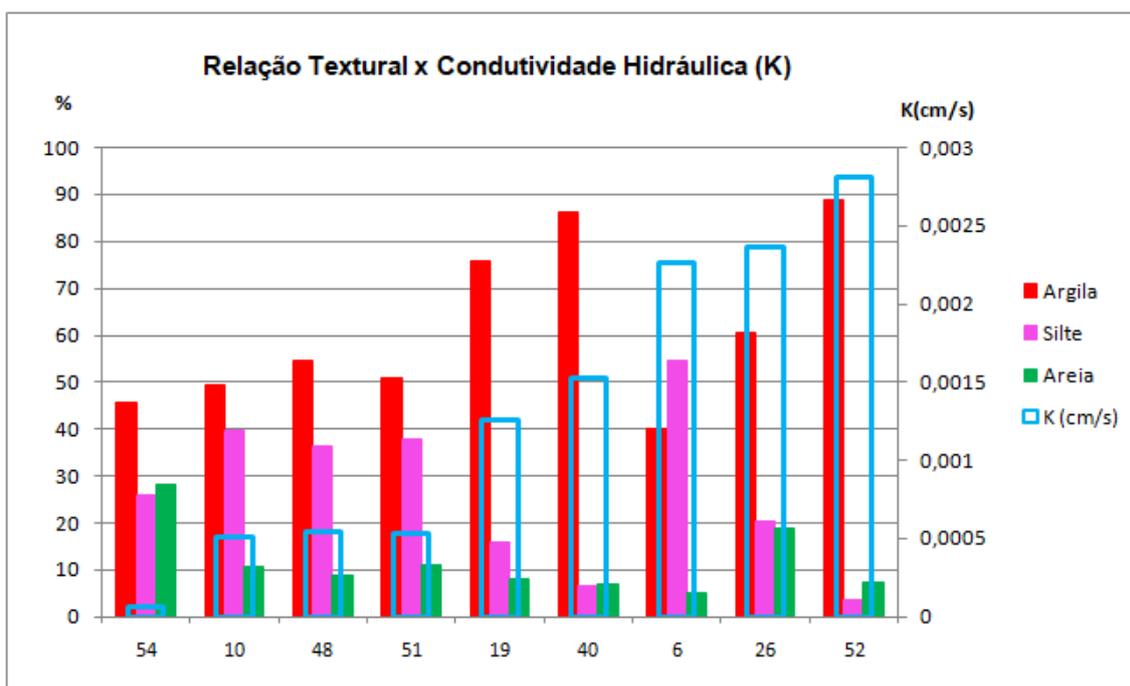


Os resultados apresentados pela análise de DRX, mostram conforme apontado por Santos *et al.*, (2018), características do Horizonte B Latossólico.

8.2. Ensaio de Infiltração no Solo

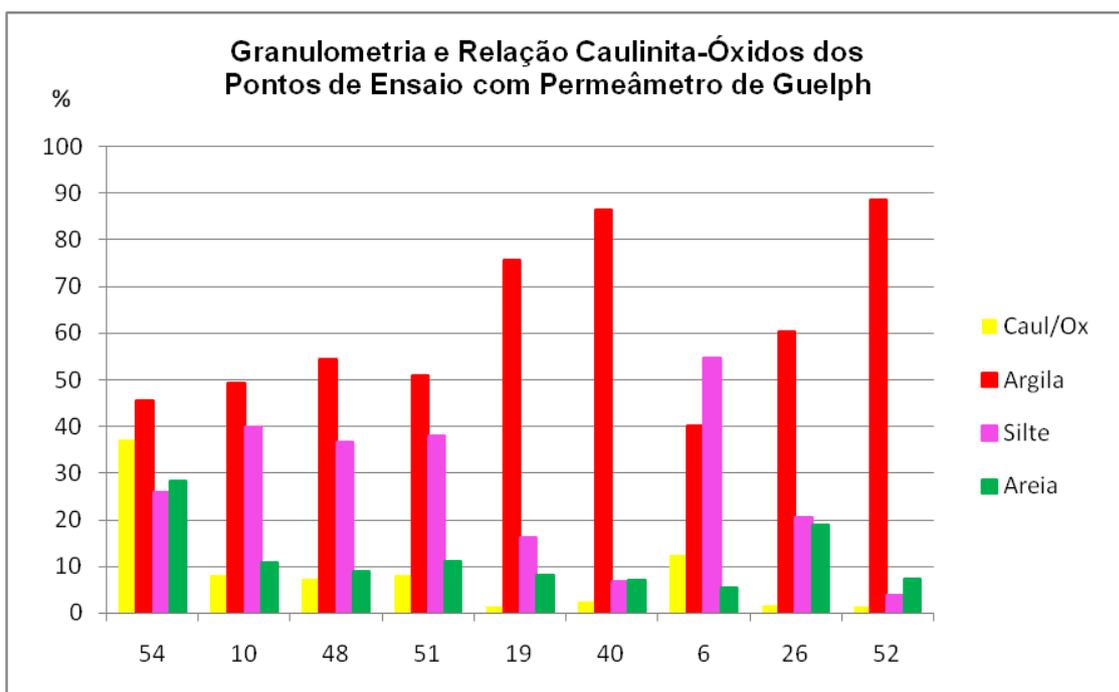
Os resultados demonstram que apesar das amostras apresentarem homogeneidade textural na classe argilosa, há diferenças entre os tipos de solo (Gráfico 8.3 e Tabela 8.3). A análise estatística apresentada no item 6.1.2. mostra claramente que Latossolos e Cambissolos na área de estudo têm o mesmo comportamento em relação à textura, o que é evidenciado nos ensaios de infiltração.

Gráfico 8.3 - Comparação textural versus condutividade hidráulica.



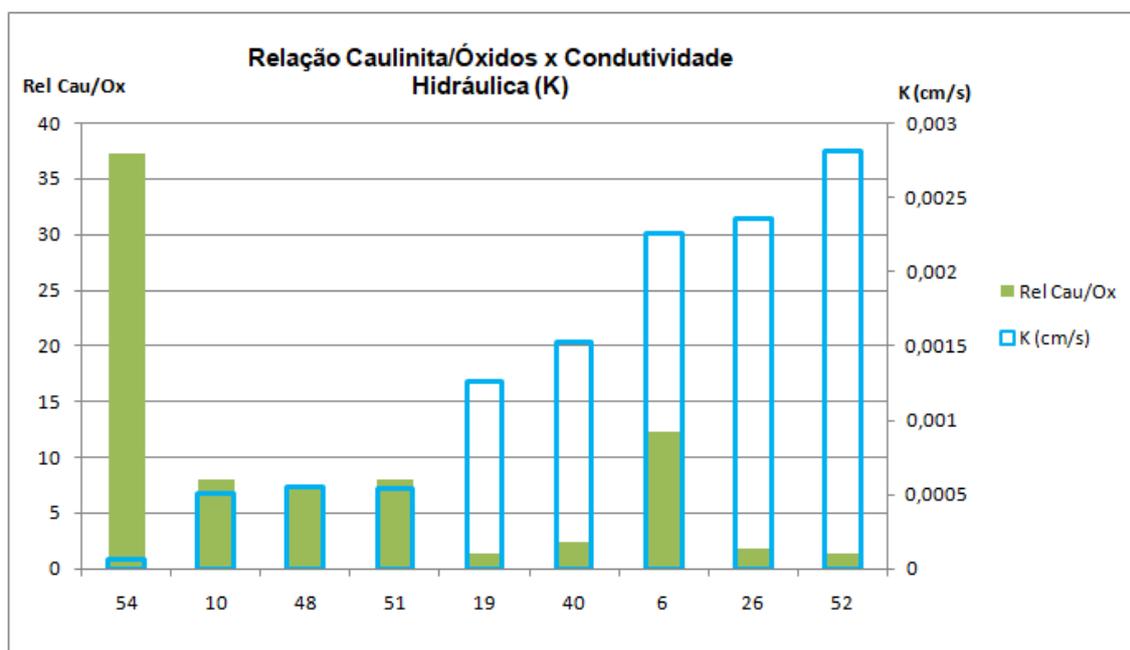
Observa-se pelos resultados apresentados no Gráfico 8.3 que a condutividade hidráulica na área de estudo não pode ser explicada somente pela relação textural. Aponta-se também a influência mineralógica dada pela relação caulinita-óxidos, conforme apresentado no Gráfico 8.4.

Gráfico 8.4 - Comparação da relação caulinita-óxidos com as demais texturas.



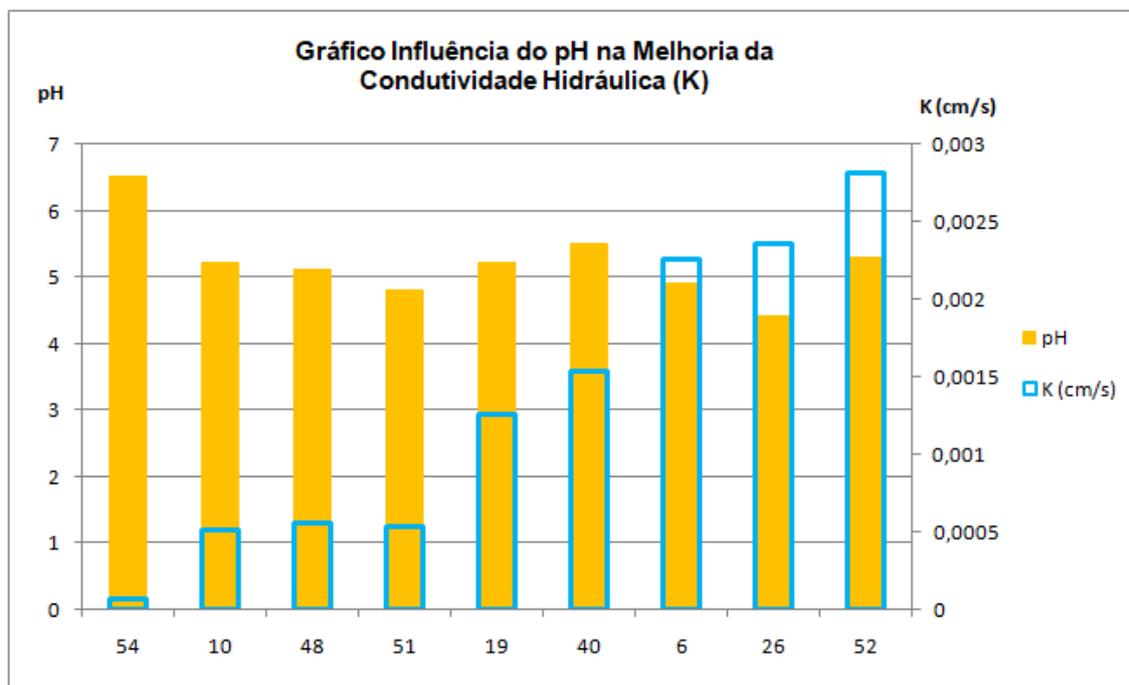
Desta forma, a condutividade hidráulica é influenciada pela quantidade de óxidos, uma vez que estes melhoram a proporção de poros condutores de água, ou seja, quanto maior a relação caulinita-óxidos, menor é a condutividade hidráulica. Conforme exposto por Fassbender (1994), a superfície específica é uma das propriedades mais importantes das argilas por ser esta propriedade a responsável pelas reações das argilas com outros compostos. A superfície específica da caulinita é a menor dentre os argilominerais. Este autor ainda ressalta que os grupos de OH presentes na superfície da caulinita permitem uma forte adsorção de hidróxidos de ferro, unindo de forma eficiente as partículas individuais delas, alcançando granulometricamente o tamanho de areias. Brady e Weil (2013) chamam este processo em solos altamente intemperizados de pseudoareias. Isso explica porque que as menores condutividades hidráulicas na área de estudo ocorrem nas áreas onde se tem a menor quantidade de óxidos (hidróxidos), conforme observado no Gráfico 8.5.

Gráfico 8.5 - Relação caulinita/óxidos versus condutividade hidráulica.



O pH influencia diretamente na adsorção dos óxidos, quanto maior o pH menor é a adsorção na superfície da caulinita e conseqüentemente menor a condutividade hidráulica, o que pode ser observado no Gráfico 8.6.

Gráfico 8.6 - pH versus condutividade hidráulica nos pontos de ensaio com Permeômetro de Guelph na área estudada.



A escolha dos ensaios na área de estudo por meio da análise das discrepâncias texturais dentro da mesma classe argilosa para os diferentes tipos de solos mostrado no triângulo textural foi válida, observando condutividades também diferenciadas, apesar de todas serem classificadas como argilosas.

A Tabela 8.3 mostra a variabilidade da condutividade hidráulica na área de estudo para cada tipo de solo.

Tabela 8.3 - Variabilidade da condutividade hidráulica em relação ao tipo de solo nos diferentes pontos ensaiados.

	Pontos								
	6	10	19	26	40	48	51	52	54
K (cm/s)	$2,26 \times 10^{-3}$	$5,08 \times 10^{-4}$	$1,26 \times 10^{-3}$	$2,36 \times 10^{-3}$	$2,99 \times 10^{-3}$	$5,51 \times 10^{-4}$	$5,38 \times 10^{-4}$	$2,81 \times 10^{-3}$	$6,34 \times 10^{-5}$
Tipo Solo	Argissolo	Cambissolo	Latossolo	Latossolo	Cambissolo	Latossolo	Cambissolo	Latossolo	Gleissolo

Os resultados mostram que Latossolos e Cambissolos apresentam a mesma variabilidade (10^{-3} a 10^{-4} cm. s⁻¹), Argissolos (10^{-3} cm. s⁻¹) e Gleissolos (10^{-5} cm. s⁻¹). A partir desses resultados e pela análise estatística através de análise de componentes principais realizada para dar pesos aos parâmetros no IAN, concluiu-se que realmente as

classes de solo Cambissolo e Latossolo possuem características similares na área de estudo.

Uma pergunta pode ser feita: como a condutividade se alteraria em profundidade? Nas porções mais profundas insaturadas do epicarste, a condutividade hidráulica é menor devido à frequência e abertura das fraturas, porém Selker *et al.*, (1999), apresenta resultados obtidos a partir da espessura da zona vadosa associada ao tipo de textura (Figura 8.2).

Figura 8.2 - Diferenças de K em relação à profundidade da zona saturada com o tipo de solo.



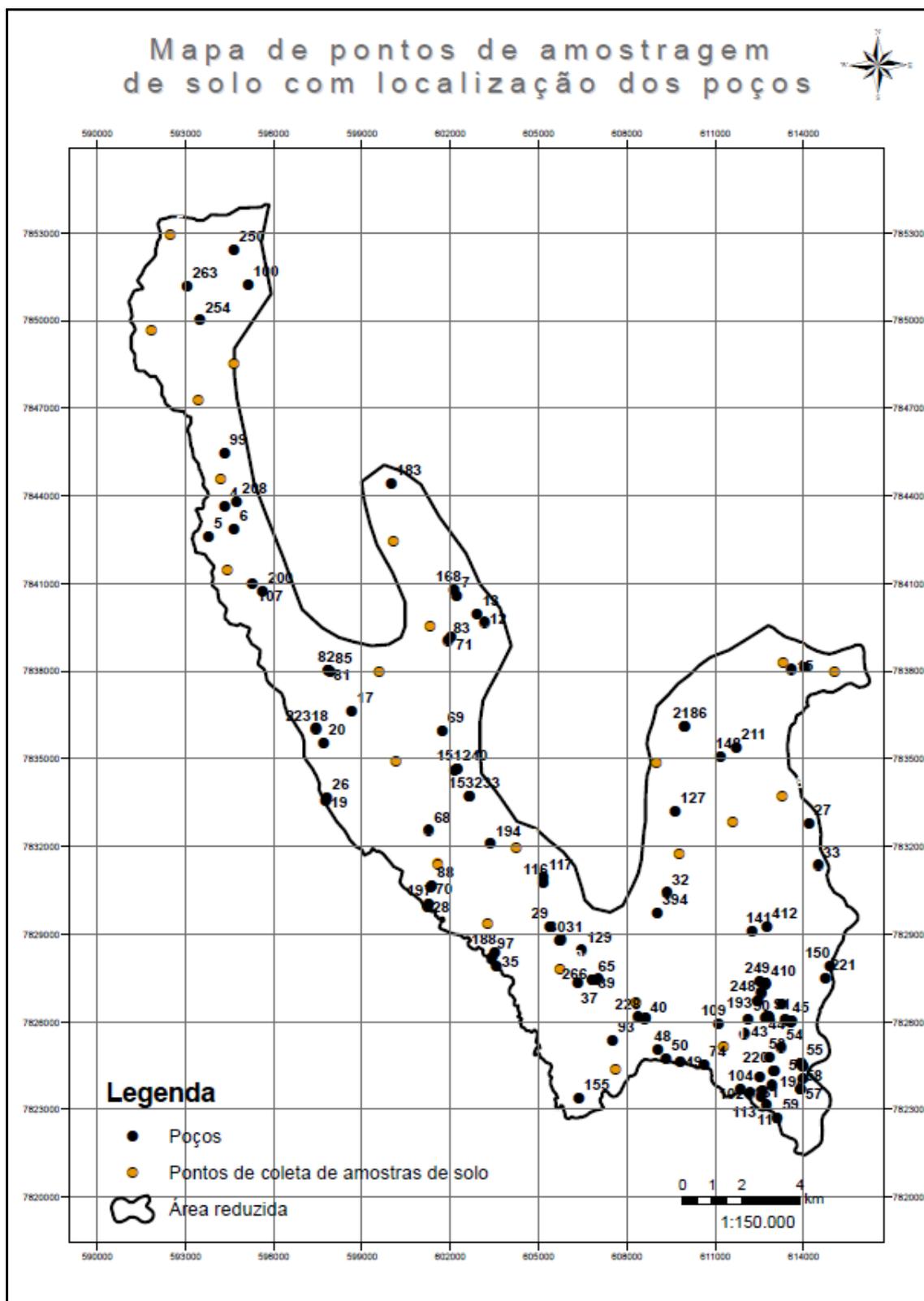
Fonte: SELKER, (1999).

A partir da análise da Figura 8.2 observa-se que quanto mais próximo a superfície maior a facilidade para entrada de contaminantes, haja vista que a condutividade hidráulica diminui exponencialmente com a profundidade bem como o pH e o CO₂, o que afeta a chegada de potenciais contaminantes no aquífero.

8.3. Método Original e COP-Solo "Camada O"

Os mapas de espessura de solo foram elaborados a partir da análise do perfil litológico dos poços tubulares, de levantamentos segundo metodologia apresentada no item 2.3, com boa qualidade de aproximação dos dados em relação aos pontos de coleta de amostras de solo. A Figura 8.3 mostra os pontos de poços com relação aos pontos de amostragem.

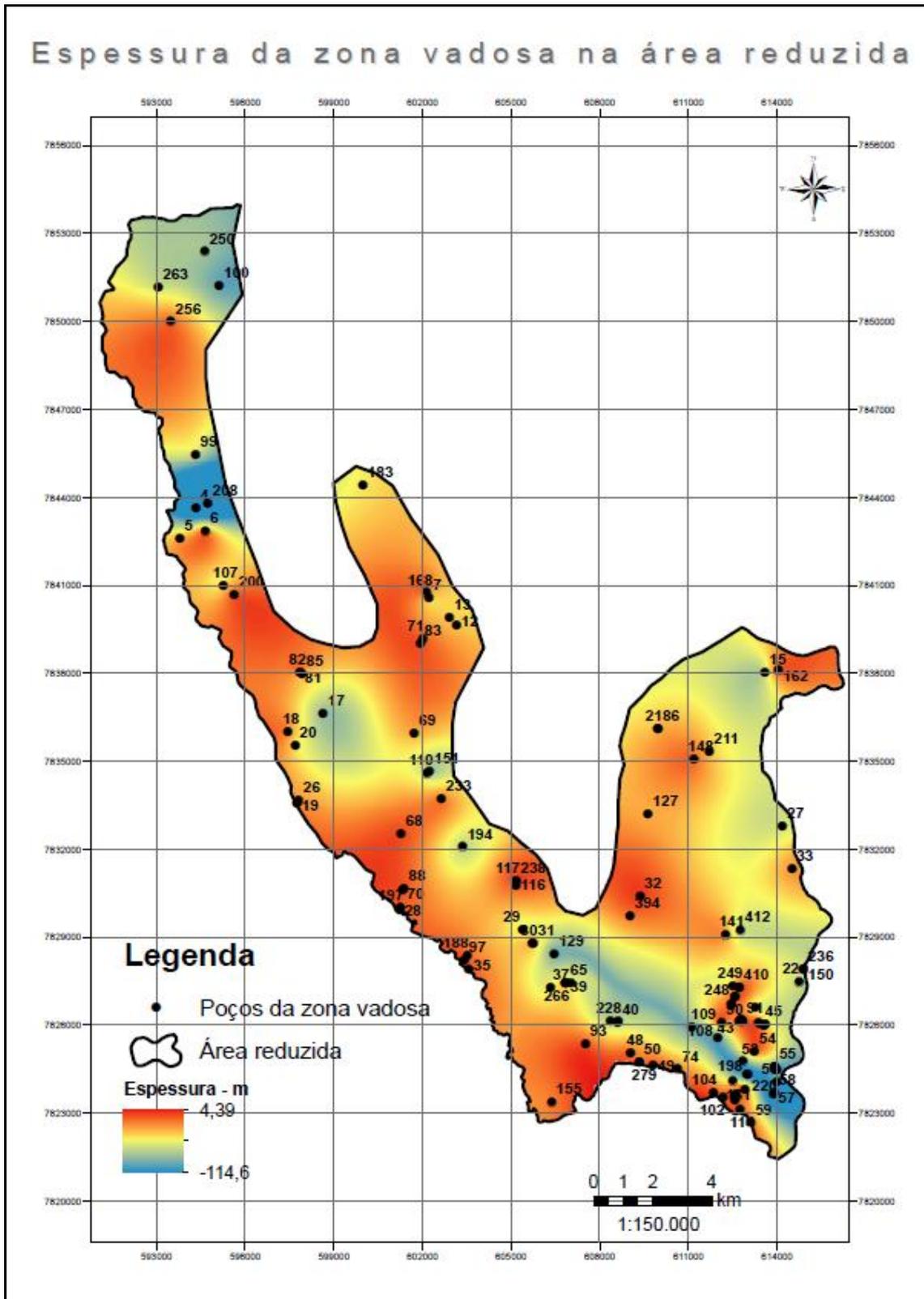
Figura 8.3 - Localização dos poços em relação aos pontos de amostragem de solo.



Essa aproximação das informações dos poços em relação aos pontos de amostragem foi de fundamental importância para assegurar qualidade dos dados de espessura de solo abaixo dos pontos de coleta de amostras.

Dessa forma, também se gerou o mapa de espessura de zona vadosa, onde por subtração do mapa de espessura de solo, chegou-se à espessura de rocha presente na zona vadosa. A Figura 8.4 apresenta o mapa de espessura da zona vadosa.

Figura 8.4 - Mapa espessura da zona vadosa.



A partir dos mapas gerados, foi possível calcular os parâmetros necessários para construção dos mapas de *O Score* para o método original e para o método modificado. Esses resultados são apresentados na Tabela 8.4 e nas Figuras 8.7 e 8.8.

Tabela 8.4 - Comparação dos valores O Score do método original e modificado.

Ponto	Método Original		Método Modificado	
	O Score	Classe de Proteção	O Score	Classe de Proteção
3	10	Muito Alto	3	Moderada
4	9	Muito Alto	2	Baixa
5	10	Muito Alto	3	Moderada
18	10	Muito Alto	3	Moderada
19	10	Muito Alto	3	Moderada
20	10	Muito Alto	3	Moderada
30	10	Muito Alto	4	Moderada
31	4	Moderado	3	Moderada
37	9	Muito Alto	2	Baixa
38	10	Muito Alto	3	Moderada
42	10	Muito Alto	3	Moderada
44	10	Muito Alto	4	Moderada
47	10	Muito Alto	3	Moderada
48	10	Muito Alto	3	Moderada
49	10	Muito Alto	3	Moderada
51	10	Muito Alto	4	Moderada
52	10	Muito Alto	3	Moderada
53	4	Moderado	3	Moderada
54	10	Muito Alto	4	Moderada
55	10	Muito Alto	3	Moderada
56	10	Muito Alto	4	Moderada
58	10	Muito Alto	3	Moderada
60	10	Muito Alto	4	Moderada

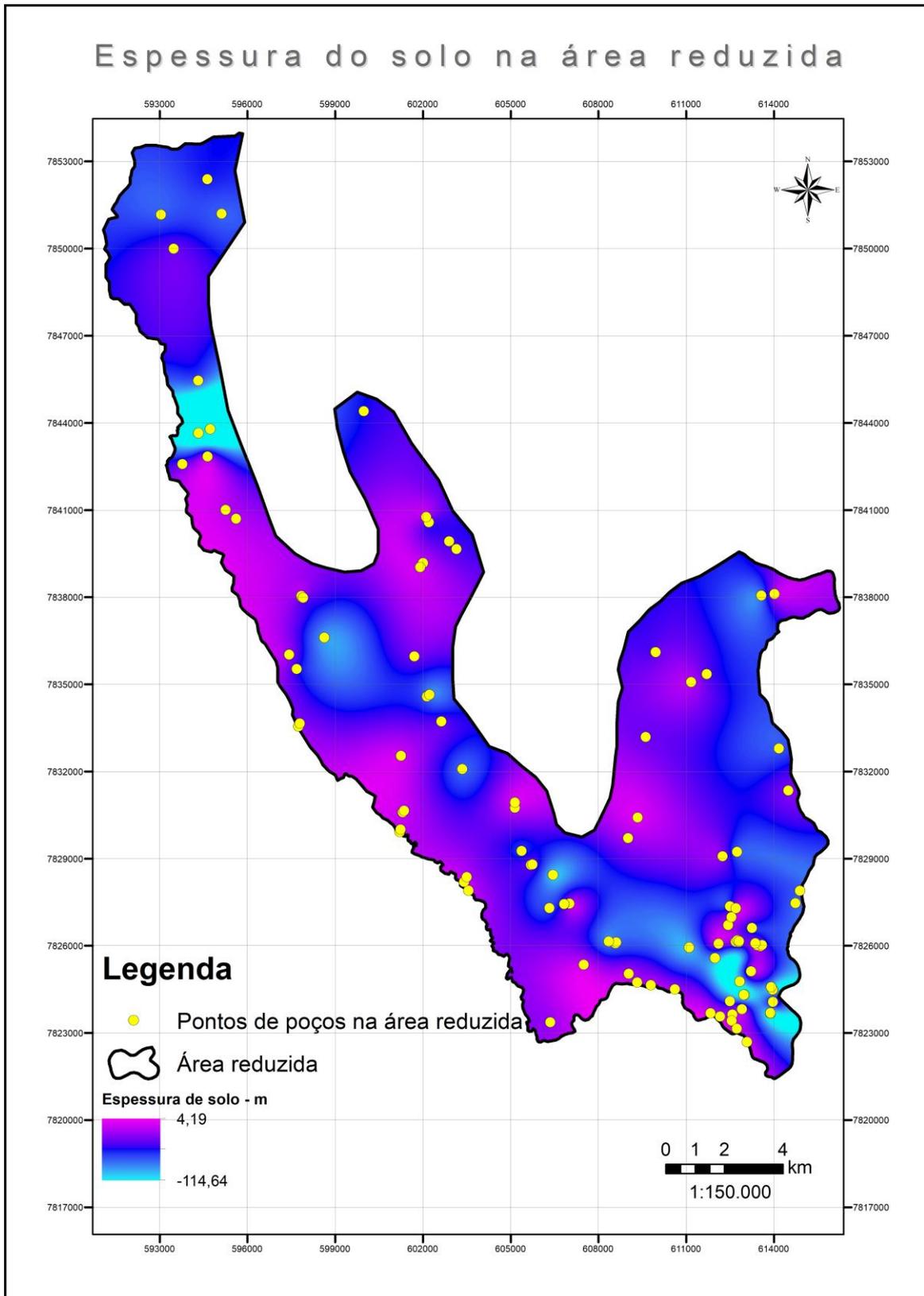
Os resultados demonstram que diferentemente do método original, para o qual não existe o valor $l_y = 0$, ou seja, a não existência de rochas na zona vadosa, algo comum no carste tropical da área de estudo, há a necessidade de criar essa alternativa, conforme proposto no método modificado. Sem ela, o maior valor de proteção que é proporcionado pela argila, tanto para o fator solo quanto para o fator litologia é levado em consideração duas vezes, propiciando valores de muito alta proteção dessa camada, o que não condiz com a realidade. Nesse sentido, há uma super valorização da camada argila para O_s e O_L . O cálculo levado em consideração do ponto 31 para o método original reflete esta dificuldade de utilização do método original, pois para espessuras

de solo menores que 1,0m não há como calcular O_L , e o fator *O Score* só é dado pelo valor de O_s , impossibilitando, desta forma, a aplicação do método original.

Outra característica importante verificada, é que nos 129 poços localizados na área original do projeto que detinham informações de coordenadas geográficas, descrição litológica e N.E., somente 16 apresentaram espessura de rocha na ZV e destes, somente seis apresentaram essa camada com valor superior a 10 m. Mesmo nestes poucos pontos, há de se levar em consideração que os mesmos estão encobertos por espessas camadas de argilas. Isto faz com que o subfator l_y do método original perca sua importância haja vista que as discontinuidades podem estar preenchidas por este material argiloso, comportando-se como solo nos processos de infiltração, conforme dados apontados por Pessoa (2005). Este autor encontrou argila preenchendo discontinuidades a 100,0 m de profundidade, observada em análises de testemunhos de sondagens no extremo sul da área estudada.

A Figura 8.5 corrobora a decisão de cortar 260 Km² de área que detinha somente quatro poços com informações de espessura de solo, para manter uma melhor relevância dos resultados apresentados da área reduzida. Mesmo onde há dados para realização de uma interpolação razoável, fica demonstrado na Figura 8.5 que onde não tem dado suficiente o *software* faz a interpolação, porém algumas espessuras são consideradas positivas, o que não é compatível. Há a necessidade de realizar uma análise crítica para verificação de saída do *software*. Da mesma forma, é nítido na figura as abruptas mudanças de espessuras, o que não acontece na realidade. Deve-se agir com cautela e ter um olhar crítico quando se usa *softwares* como ferramenta principal de métodos de interpolação poderosos. Para a construção do IAN, somente o Ponto 53 (coleta de amostra de solo-extremo sul da área estudada) apresentou resultado positivo para espessura logo abaixo do ponto, sendo contornada essa situação adotando como espessura a menor encontrada pela interpolação dentre todos os pontos, ou seja, 0,52 m.

Figura 8.5 - Mapa espessura de solo.



A simulação realizada na área original demonstrou que a inserção de novos dados, ainda que descontínuos, isto é, que não evidenciam muita relação espacial com os dados da área reduzida acaba “contaminando” a área detentora de uma densidade de pontos satisfatória.

A Figura 8.6 demonstra que a falta de dados gerou uma superfície interpolada não condizente com os dados, ela exhibe diversas porções anômalas que podem ser compreendidas como locais de ausência ou com insuficiência de dados, refletindo a pouca capacidade do programa de interpolação de trabalhar adequadamente gerando uma superfície confiável. Exemplo disso é que foram geradas espessuras com 19,0 m acima da superfície do terreno, o que é completamente incongruente com a realidade.

Quando se compara um ponto onde há espessura de solo foi definida em 6,0 m, cuja informação foi retirada de dados de perfil descritivo de perfuração de poço tubular profundo, a apenas 120 m de distância desse ponto, essa espessura atinge uma profundidade de 52 m comparando com um ponto onde a espessura foi levada tomando como base um ponto que gerou a espessura do solo a partir das drenagens perenes. Isso demonstra a pouca eficácia de definição de espessura de solo a partir dessa tentativa. Soma-se a esse cursos d'água encontrados a profundidade de 170,0 m, o que não condiz com a realidade.

Os resultados comparativos obtidos após a simulação levando em consideração a área original e reduzida, são apresentados na Figura 8.7.

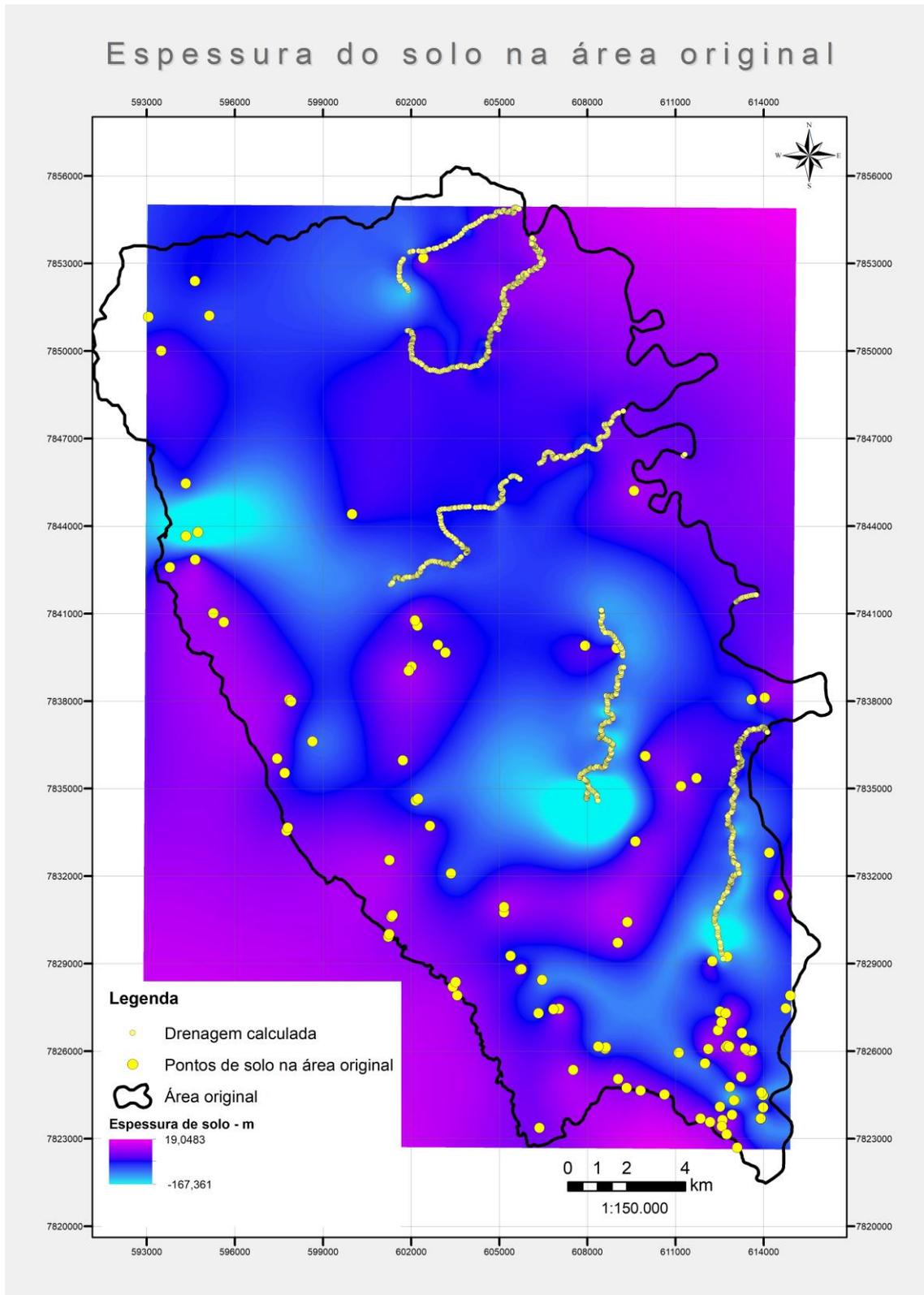
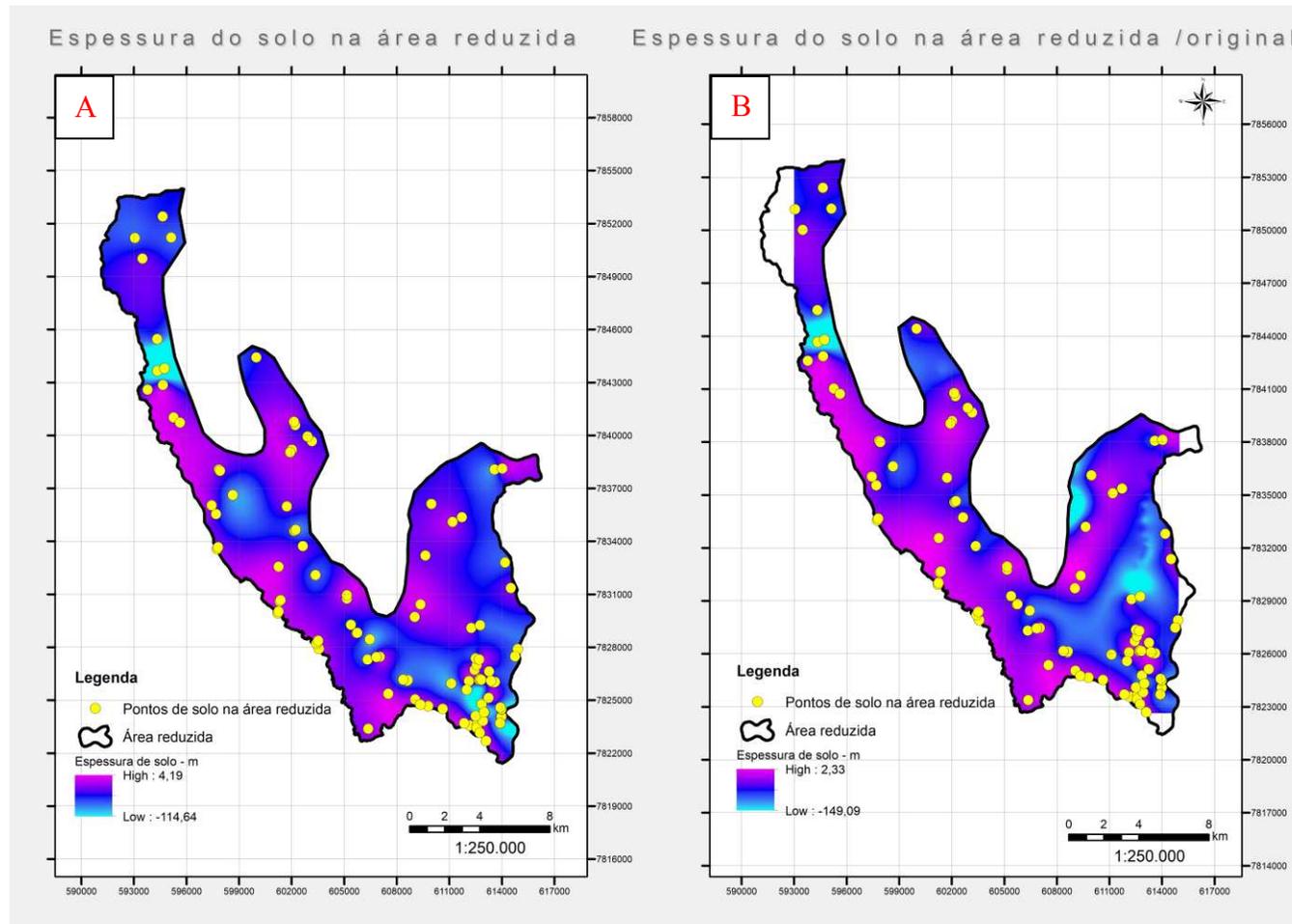
Figura 8.6 - Mapa de espessura de solo gerado para área original.

Figura 8.7 – Comparação entre os mapas gerados para as duas áreas. (A) área reduzida utilizando densidade de dados adequada em 240 km². (B) área retirada da interpolação realizada com a área original (500 km²) em que apresentou apenas 4 dados em 260 km².



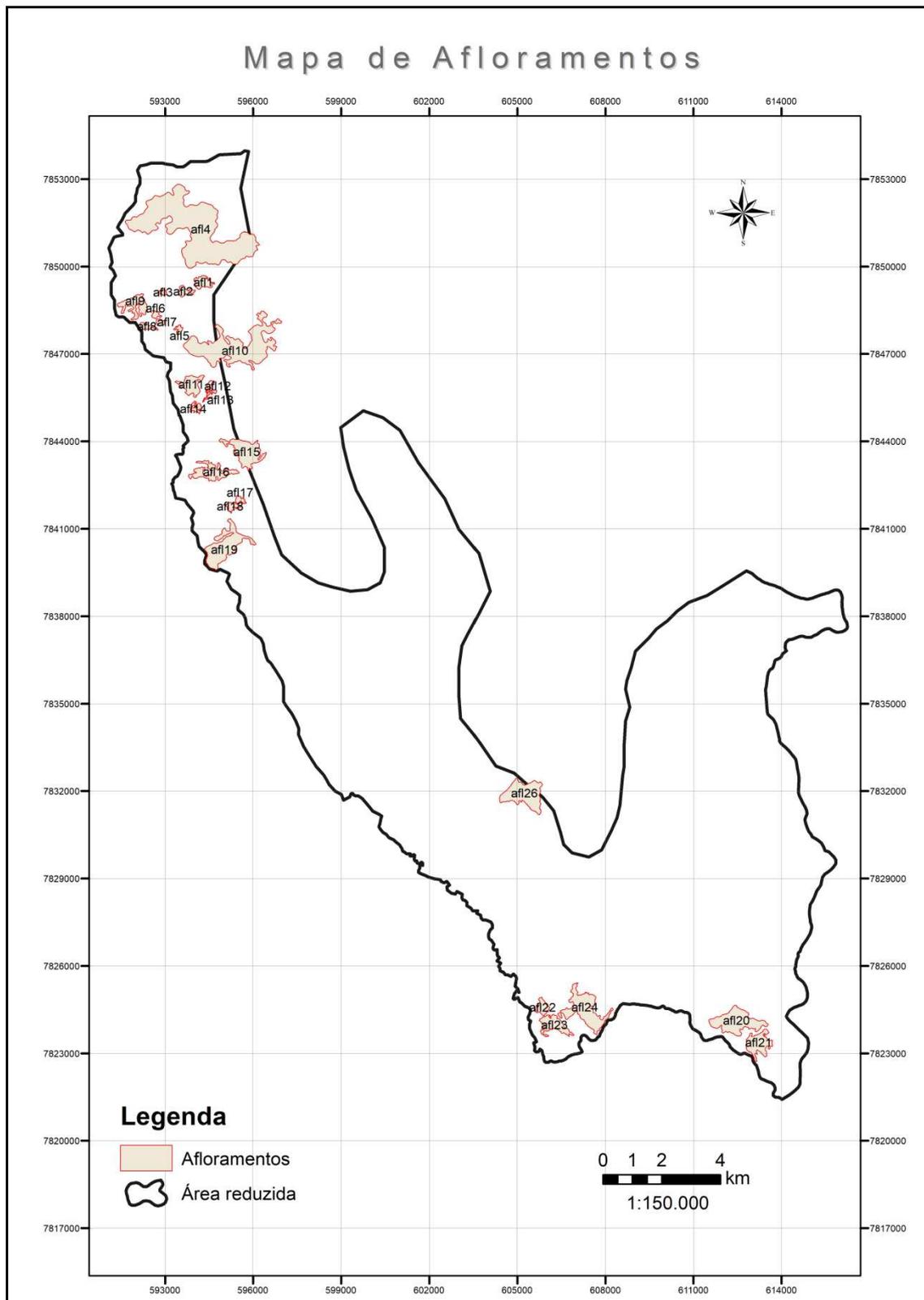
Fonte: Desenhos do autor.

A Figura 8.7 mostra as discrepâncias, evidenciadas pela “contaminação”, que uma área com pouca densidade de pontos tem em comparação com uma área com densidade de pontos satisfatória. Áreas de pouca e muita profundidade de solo são exacerbadas, levando a erros muito maiores se não houvesse o corte. Isso leva a erros grandes na elaboração das cartas de vulnerabilidade, e por essa razão não se considerou a área original.

Essa simulação prova que o corte da área foi correto e necessário, haja vista que a área original não detém informações suficientes em 260 Km² (somente quatro pontos com informação de perfil descritivo de poços e cinco cursos d’água e mesmo assim espacialmente prejudiciais ao processo de interpolação). Cartas de vulnerabilidade geradas a partir de incertezas tão grandes não atendem ao objetivo para o qual foram criadas.

Os resultados verificados nas Figuras 8.9 e 8.10 demonstram a aderência da hipótese apresentada e a viabilidade de utilização, em uma área reduzida, da metodologia de modificação apresentada. Nota-se que mesmo uma área com alta homogeneidade textural e em algumas regiões apresentando espessuras de solo e de zona vadosa consideráveis (que é uma característica da área estudada), a mesma não apresenta homogeneidade entre os resultados considerando as duas metodologias. Os resultados demonstram que, aplicando o método original, o par textura e espessura para o subfator O_s , na grande maioria das vezes confere alta proteção da camada ao aquífero. Como é comum a não existência de rochas na zona vadosa, o subfator O_L , para espessuras maiores ou iguais a 2,68 m de argila será sempre muito alto. Com isso, o método original supervalorizará o *O Score* elevando sua proteção. O valor $O_s=0$ é dado somente onde há afloramento de rocha na área de estudo, conforme apresentado na Figura 8.8.

Figura 8.8 - Mapa de afloramento rochoso na área estudada.



Considerando que na região de Lagoa Santa predomina o carste encoberto com o nível estático, em sua grande maioria, na zona de alteração (material inconsolidado), o *O Score* é basicamente representado pelo subfator O_s , haja vista que, para haver mudança dessa característica, o subfator O_L teria que apresentar uma espessura de camada de calcário maior que 250,0 m na zona vadosa, o que não é observado conforme demonstrado na Tabela 8.5. Mesmo onde não há afloramento, como o carste é encoberto, o fator de carstificação pode se tornar irrelevante, haja vista que as fraturas, fissuras, fendas, podem estar preenchidas com argila, podendo comportar dessa forma como material da zona de alteração nos processos de infiltração.

Tabela 8.5 - Espessura de calcário, onde há afloramento, na zona vadosa.

Identificação do Afloramento	Espessura de calcário na ZV (m)
afl1	14,01
afl2	4,66
afl3	2,81
afl4	45,35
afl5	7,95
afl6	5,14
afl7	5,65
afl8	7,05
afl9	6,60
afl10	19,99
afl11	26,28
afl12	33,66
afl13	40,01
afl14	52,79
afl15	83,61
afl16	13,90
afl17	23,11
afl18	22,71
afl19	15,60
afl20	34,42
afl21	26,09
afl22	9,14
afl23	8,89
afl24	2,00
afl26	12,22

Figura 8.9 - Resultado do O Map para o método original.

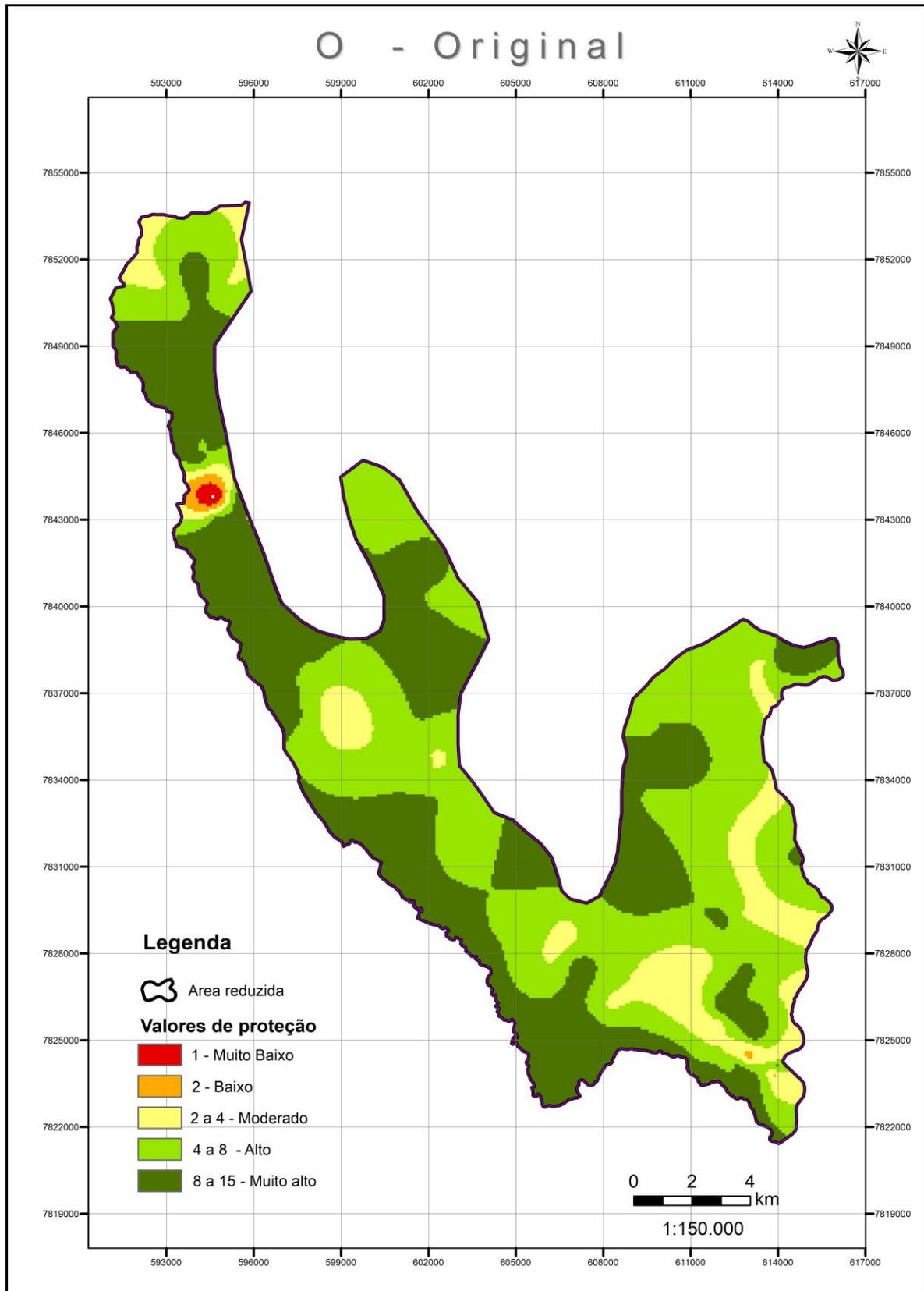
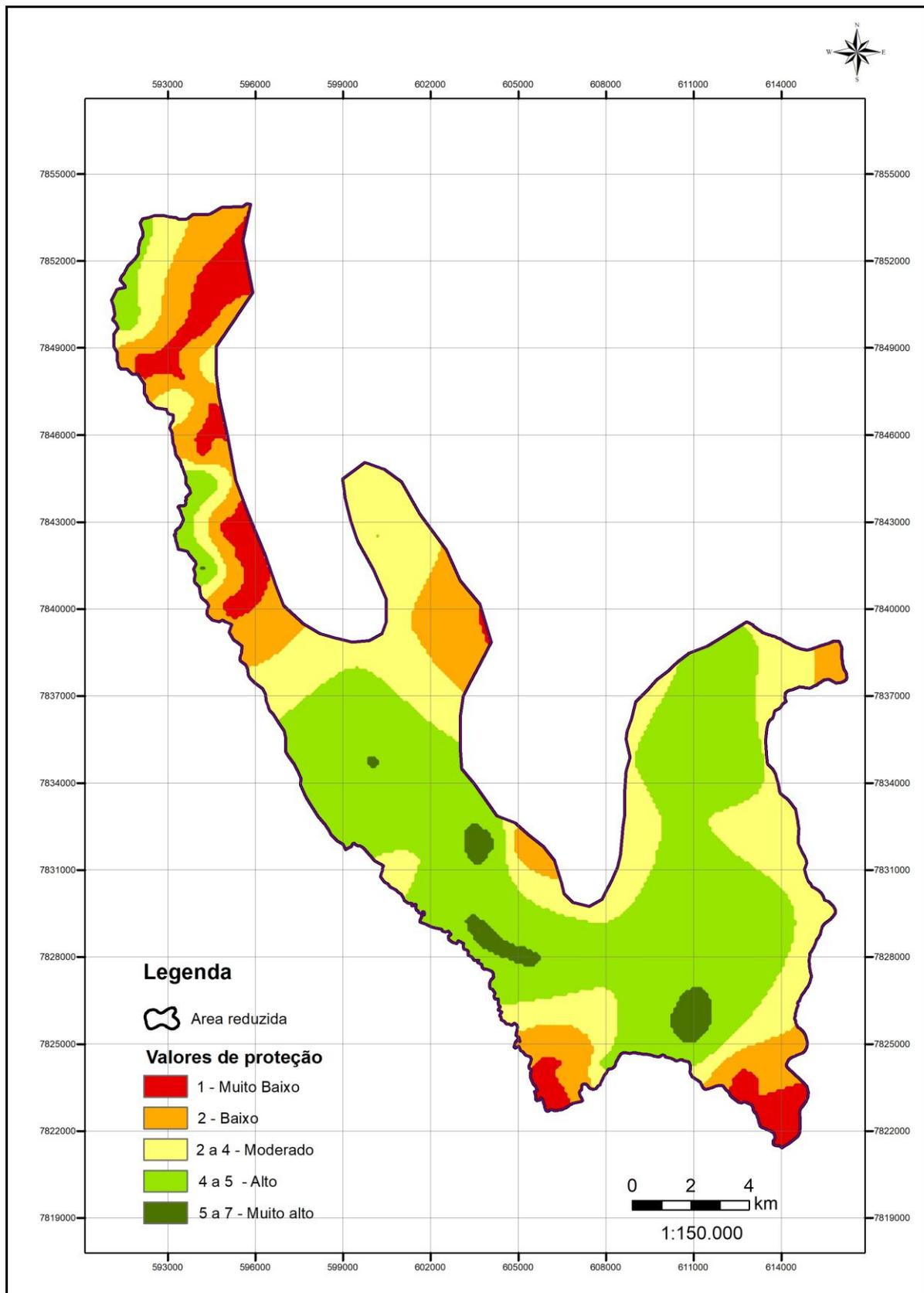
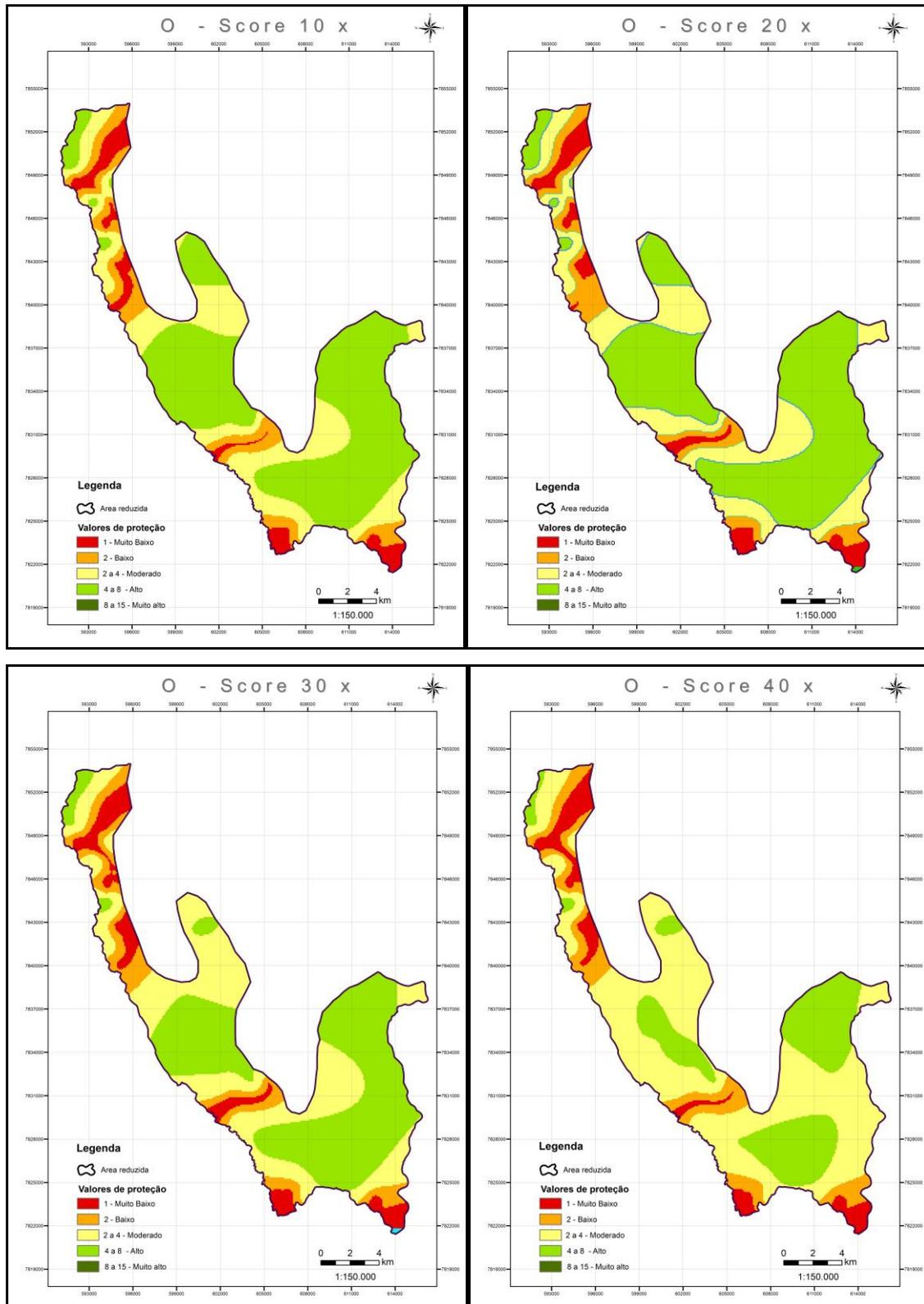


Figura 8.10 - Resultado O Map para o método COP-Solo.



Várias simulações foram realizadas, em virtude da real espessura de solo no carste tropical que afetaria o método original em seu *O Factor* (Souza *et al.*, 2020). Assim, simulações com 10X, 20X, 30X e 40X foram realizadas para verificação da hipótese testada. Os resultados apresentados a seguir, na Figura 8.11, demonstram que a metodologia COP-Solo se aproxima muito da metodologia original para 40X, ou seja, a grande diferença de espessura de solo e material de alteração sotoposto aos calcários revela a necessidade de alteração do *O Factor*, como proposto nesta tese.

Figura 8.11 - Resultados das simulações de O Score original para diferentes profundidades.



Fonte: Souza *et al.*, 2020.

Constatou-se que a partir das análises sob a ótica de espessura vs. textura para o método original, há uma gradação da classe alta para moderada, exceto onde há uma maior espessura de solo e material de alteração, conforme observado no *O Score* modificado. Assim, a aplicação do Índice de Atenuação Natural na modificação da metodologia original se mostrou coerente a realidade do carste tropical da área estudada.

8.4. Fator C

Esse fator descreve as especificidades do meio cárstico e leva em conta condições geomorfológicas (fraturas, sumidouros, *shafts*, etc.) que controlam o fluxo de infiltração rápida para o aquífero, onde a capacidade de atenuação de potenciais contaminantes é baixa.

É o modificador do fator O quando este representa o potencial de infiltração que ignora a proteção oferecida pela zona vadosa, bem como representa o quanto de precipitação (recarga) próxima ou nas feições de infiltração direta ignoram a camada protetora do aquífero (GOLDSCHIEDER *et al.*, 2000).

O fator C leva em consideração as características superficiais do aquífero que influenciam em como se produz a recarga: concentrada ou difusa.

Para o cálculo do subfator sv, foram gerados os mapas de declividade e vegetação (Figuras 8.12 e 8.13). A declividade máxima encontrada na área de estudo foi de 46%.

O mapa do subfator sv leva em consideração dois cenários (Figura 8.14 e 8.15): um para área de recarga via sumidouros e outro para área de recarga que não é via sumidouro. Esses dois cenários refletem situações diretamente relacionadas à infiltração de potenciais contaminantes, durante eventos de recarga.

Figura 8.12 – Mapa de declividade mostrando as baixas declividades encontradas na área de estudo.

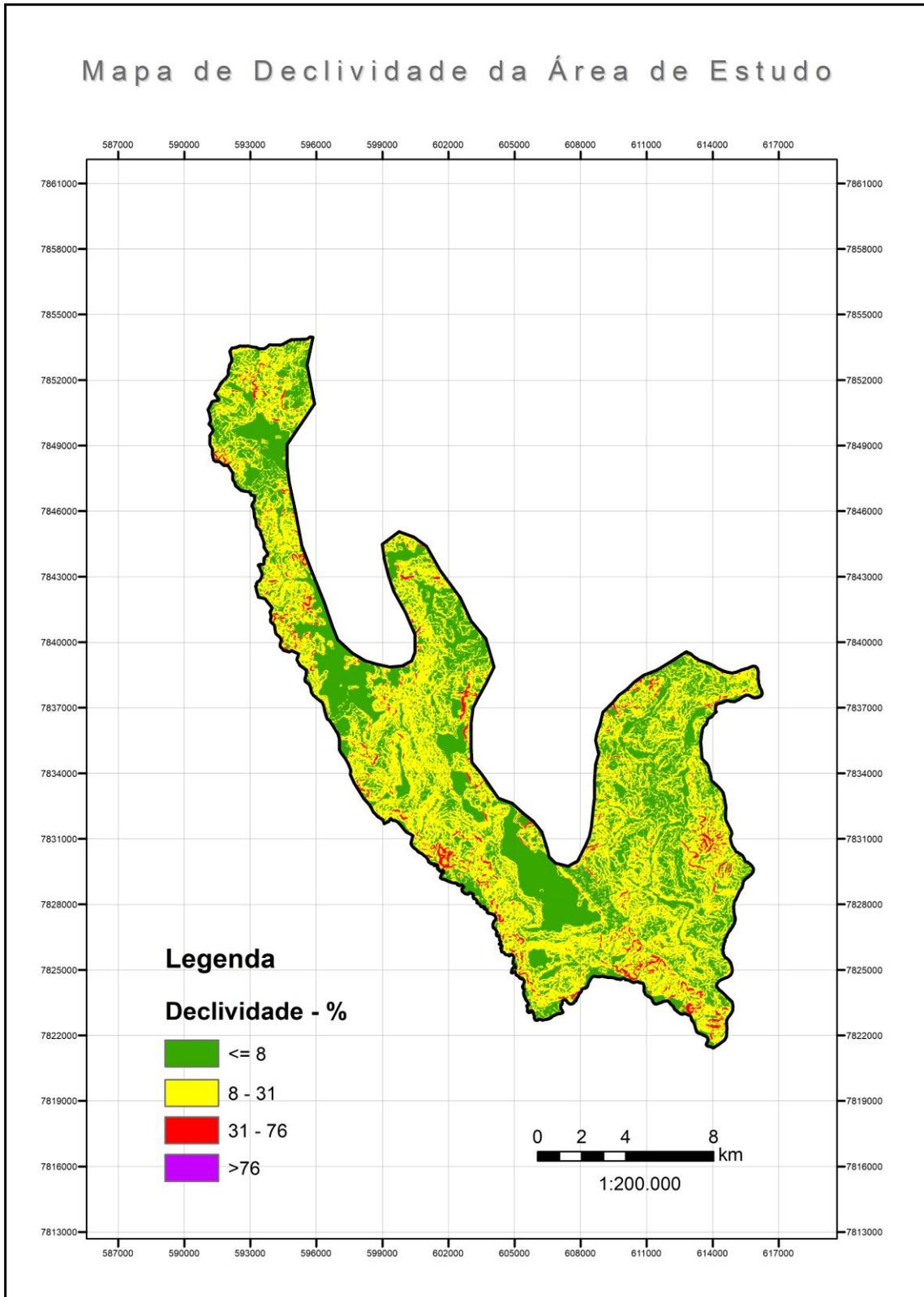
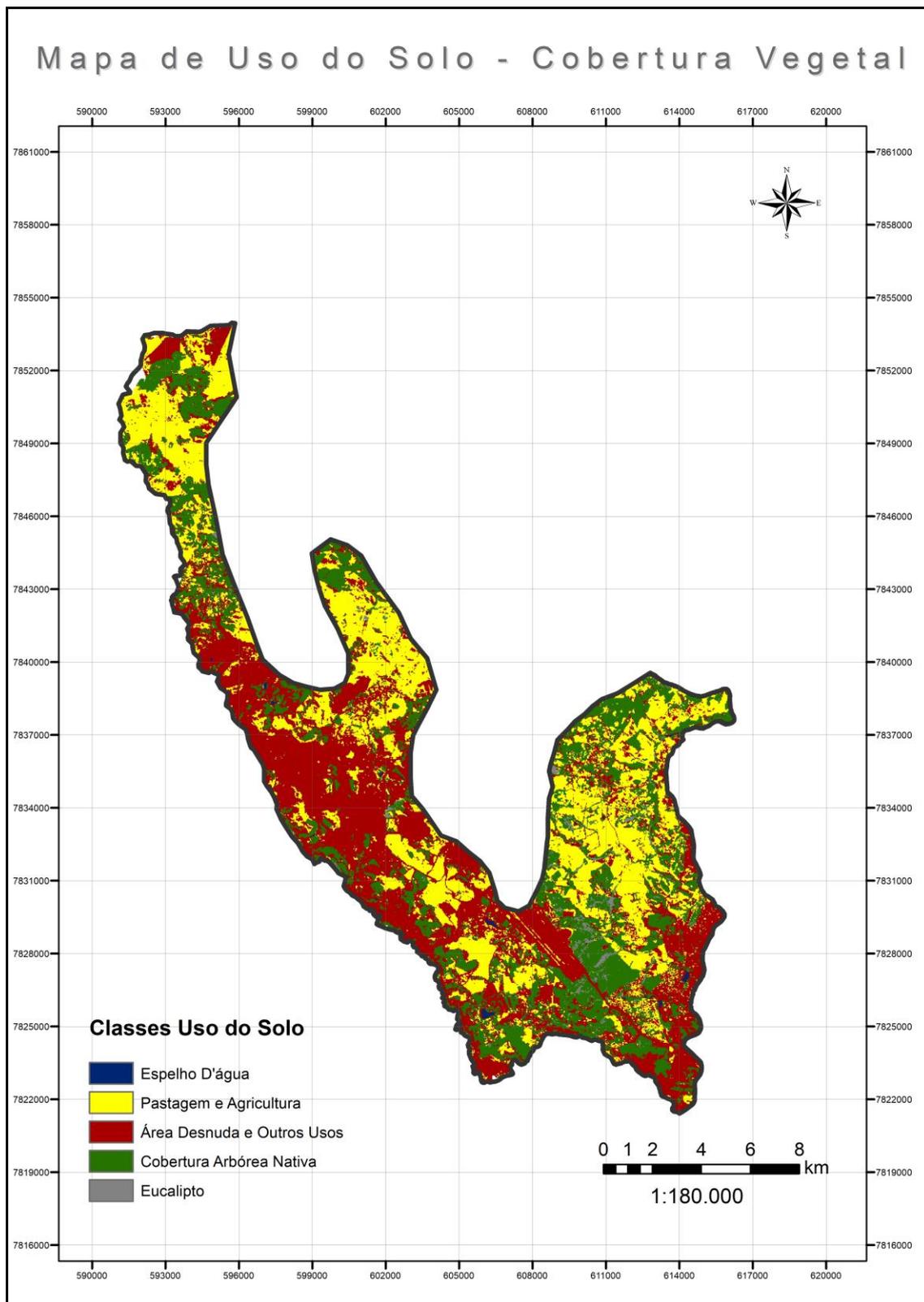


Figura 8.13 – Mapa de uso e ocupação do solo, onde observa-se classes de vegetação observadas na área de estudo.



Fonte: Modificado de PEREIRA, 2018.

Figura 8.14 – SV mapa para o cenário 1.

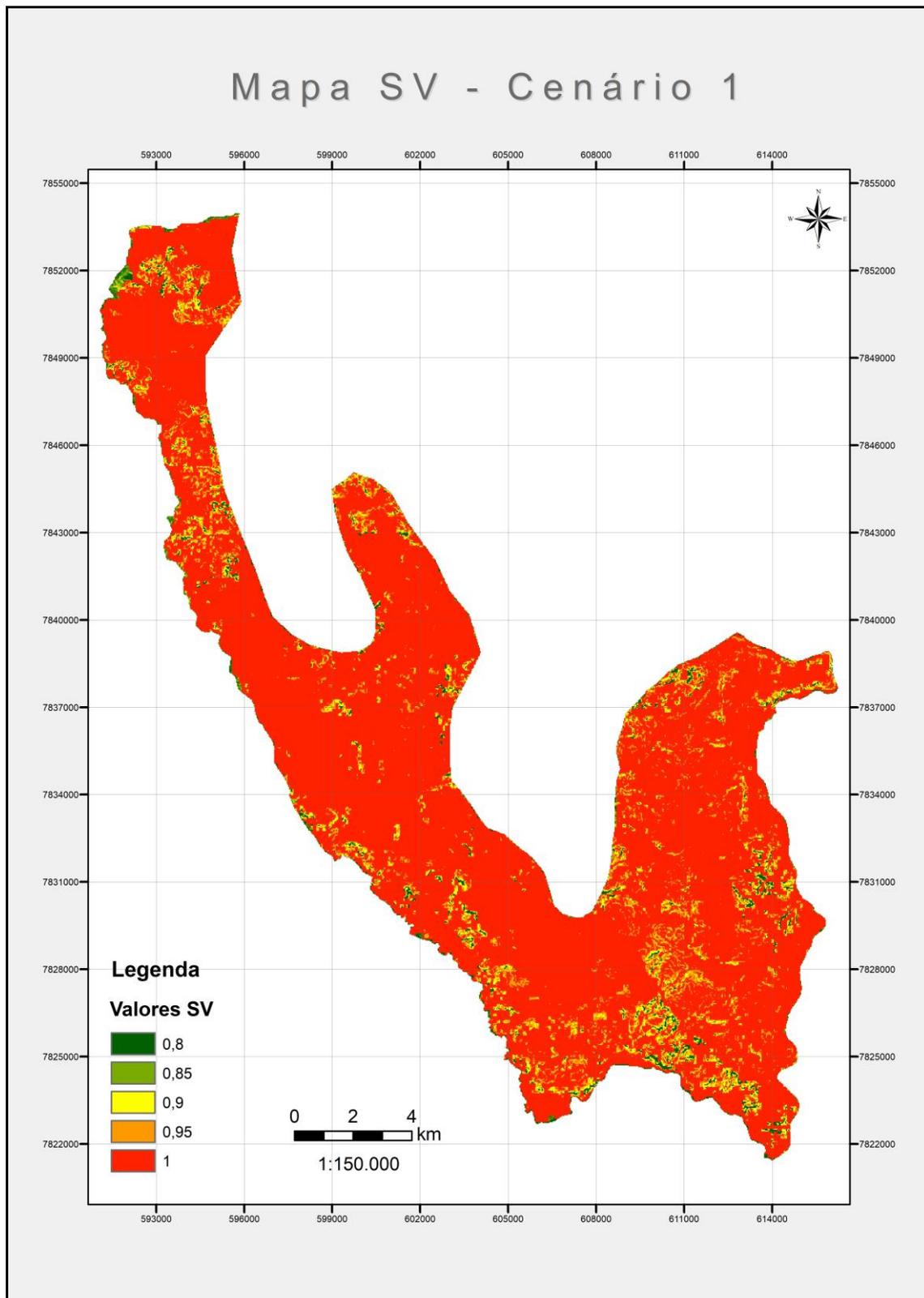
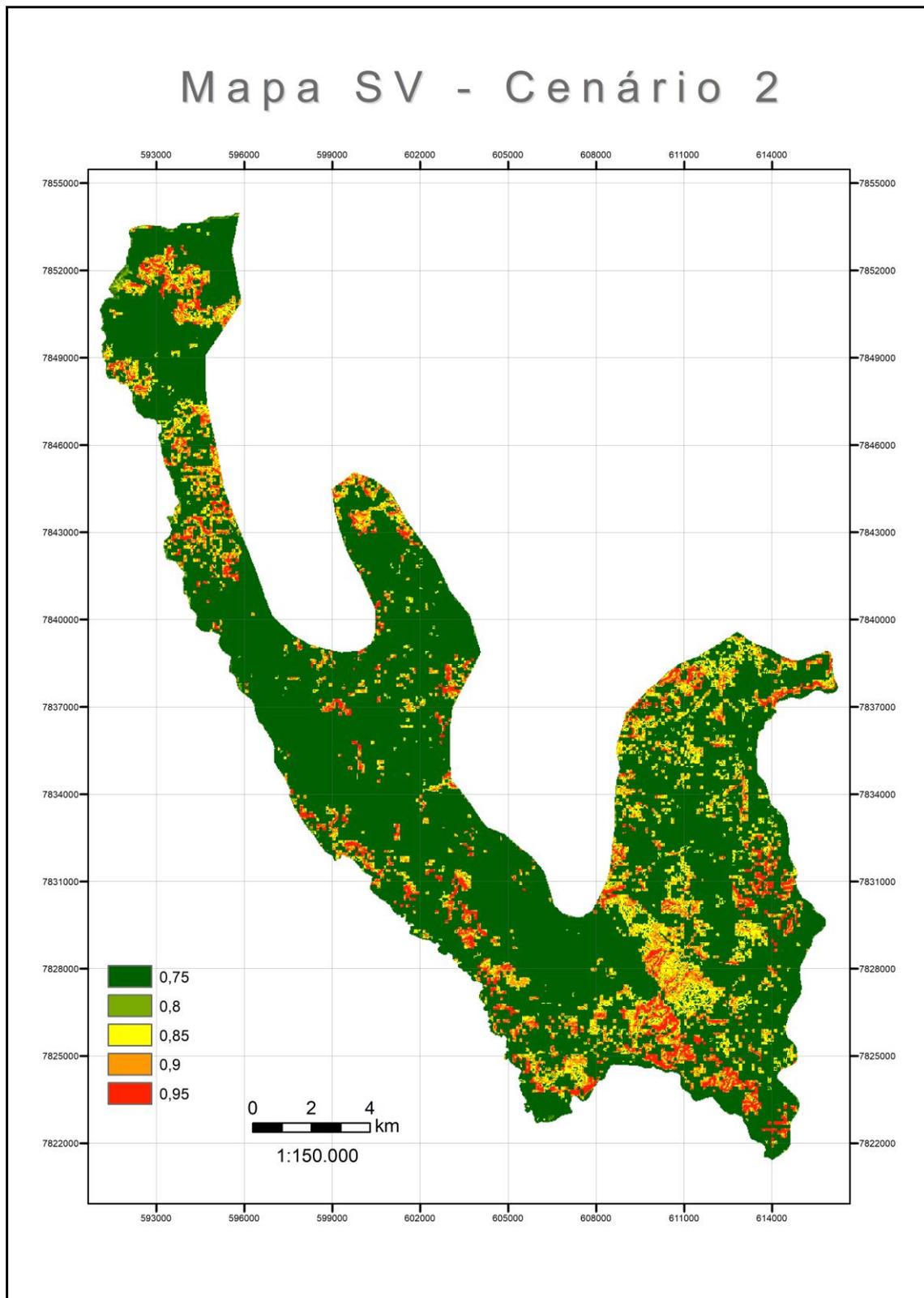


Figura 8.15 – SV mapa para o cenário 2.



Devido à baixa declividade encontrada na área de estudo (42,77% da área está compreendida nas declividades entre 0-8%, 54,76% entre 8-31%, e somente 2,47% está entre 32-46%), foi assumida a metodologia descrita no item 2.4.2 para os cálculos dh e sf.

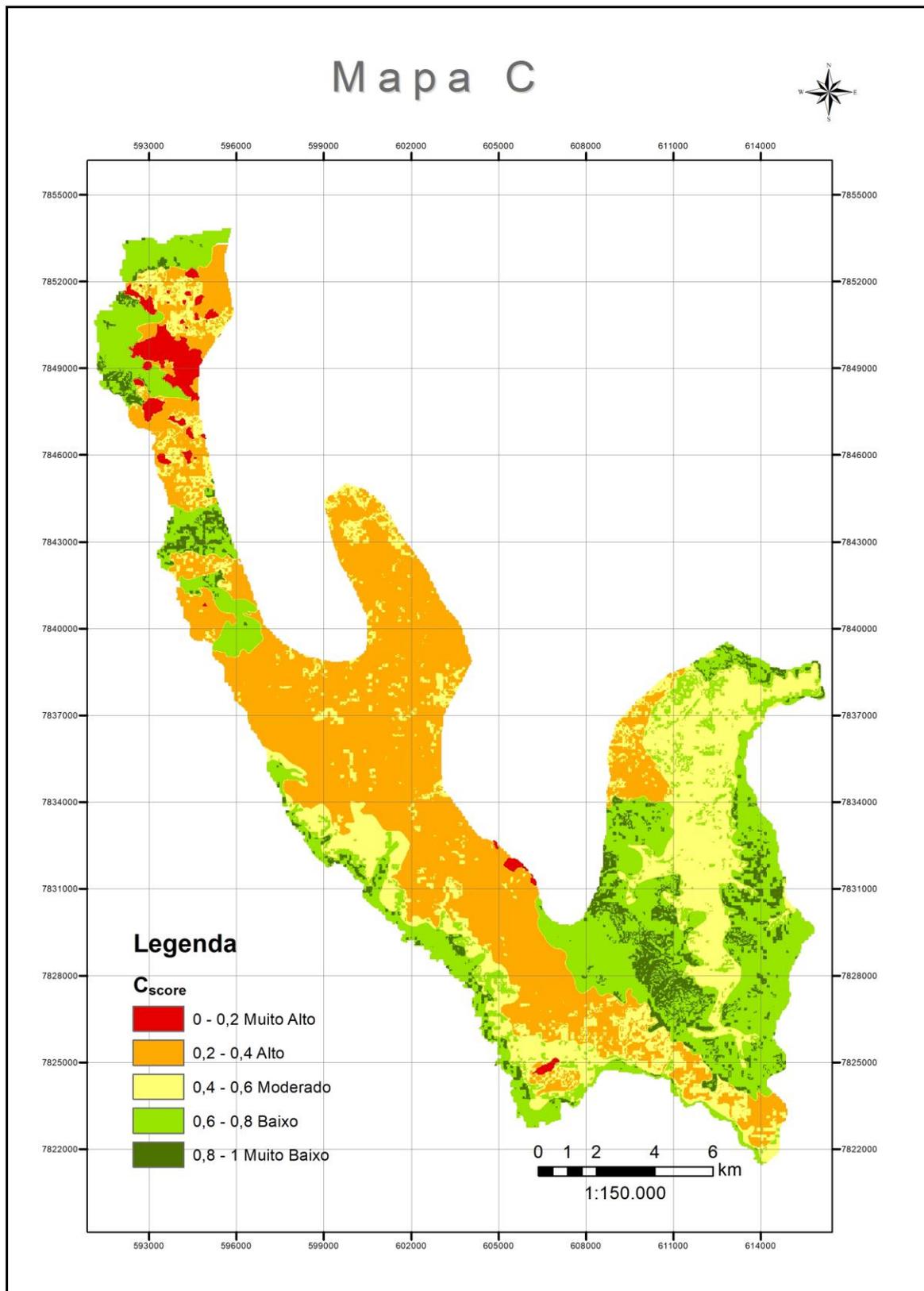
Essas características refletem observações distintas importantes quanto às estruturas de recarga direta encontradas no carste europeu mediterrâneo e tropical úmido. No primeiro caso, estas estruturas são bem marcadas e acompanhadas de forte declividade (Foto 8.1). No segundo caso, estas estruturas se fundem em ilhas de afloramentos de calcário que agregam em uma mesma área todas as estruturas de feições de infiltração direta tais como simas, *shafts*, sumidouros, *karrens*, etc. (Foto 8.2). O mapa C, Figura 8.16, sintetiza essas peculiaridades.

Foto 8.1: Características das geformas, vegetação e declividades que influenciam a construção da metodologia original (área da região do sul da Espanha).



Foto 8.2: Características das geformas, vegetação e declividades que influenciam na aplicação da metodologia original no carste tropical (área região do Carste de Lagoa Santa).



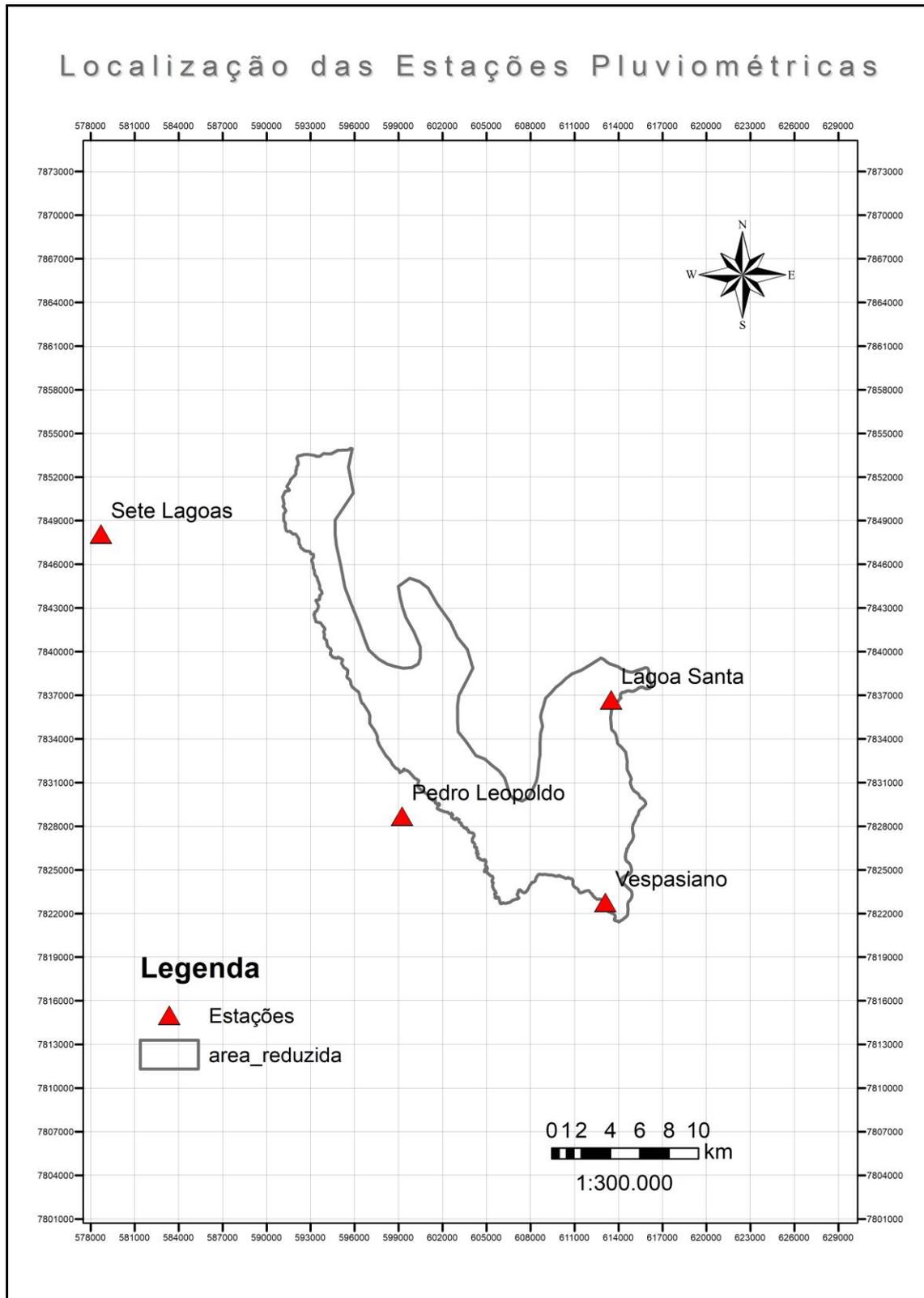
Figura 8.16 – Mapa de C_{score}

8.5. Fator P

Este fator inclui a quantidade de chuva e fatores que influenciam por exemplo, a taxa de infiltração, frequência, distribuição temporal, duração e intensidade de eventos extremos de precipitação. Estes fatores ajudam a determinar o quanto de contaminante pode ser transportado para dentro do aquífero, aumentando assim a vulnerabilidade (DALY *et al.*, 2002).

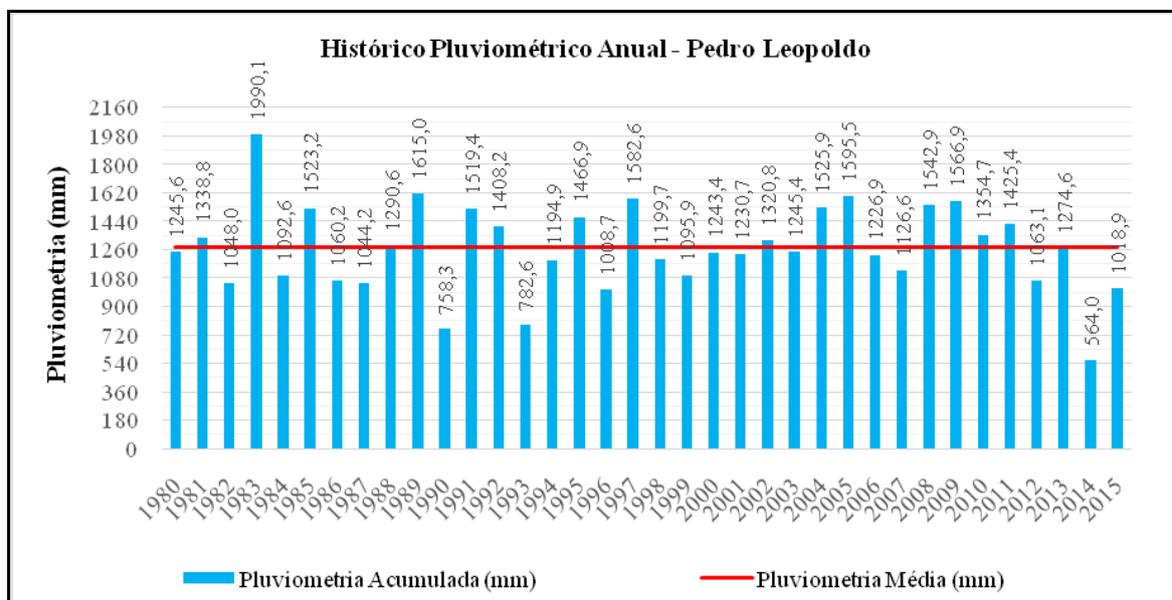
O subfator P_Q descreve o efeito da quantidade de chuva e a recarga anual sobre a vulnerabilidade da água subterrânea. Isto corresponde à média da série histórica anual de chuva para os anos úmidos. A média histórica anual foi considerada para um período de 35 anos levando em consideração as estações pluviométricas mostradas na Figura 8.17.

Figura 8.17 – Localização das estações utilizadas para o cálculo do Fator P.

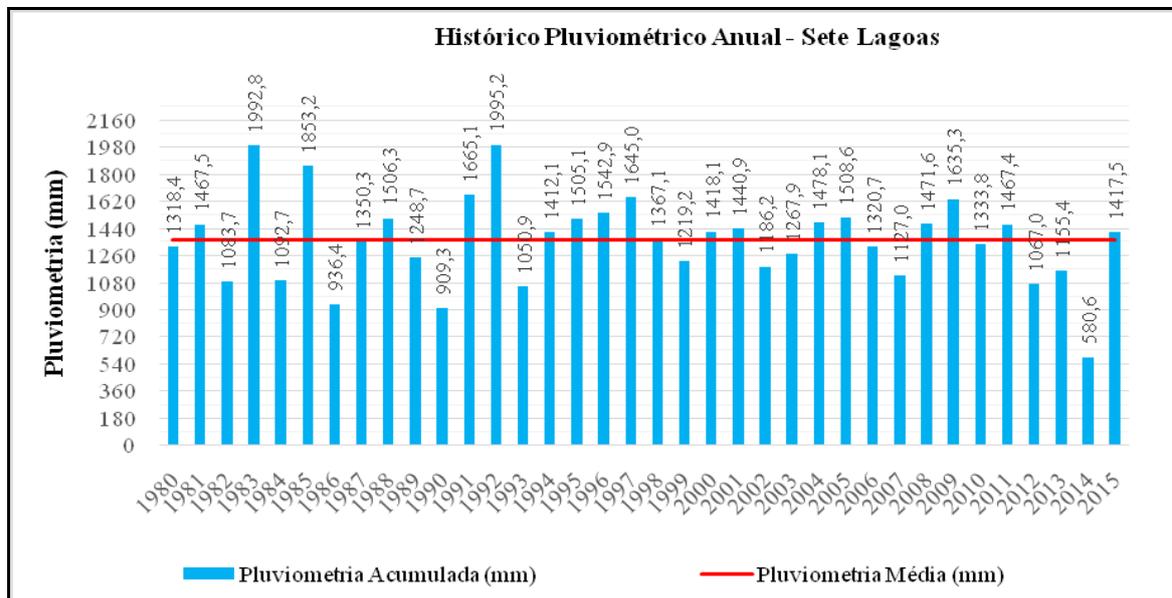


Para cada estação foi calculada a média histórica anual (Figura 8.18). Estes valores foram utilizados para definição da média de chuva dos anos úmidos.

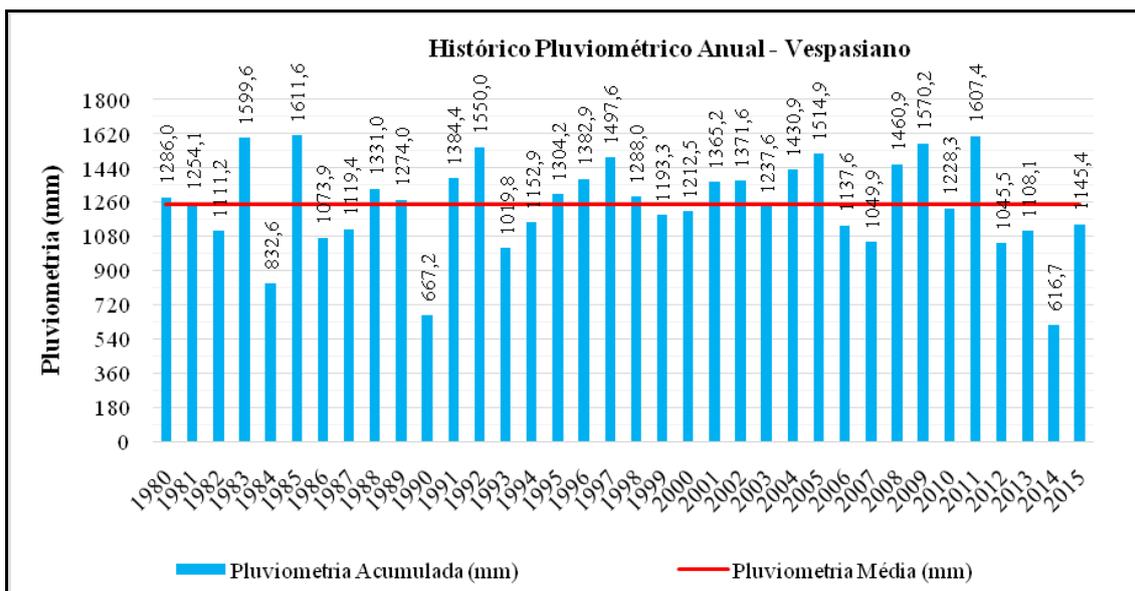
Figura 8.18 – Gráficos mostrando a média histórica anual das quatro estações consideradas.



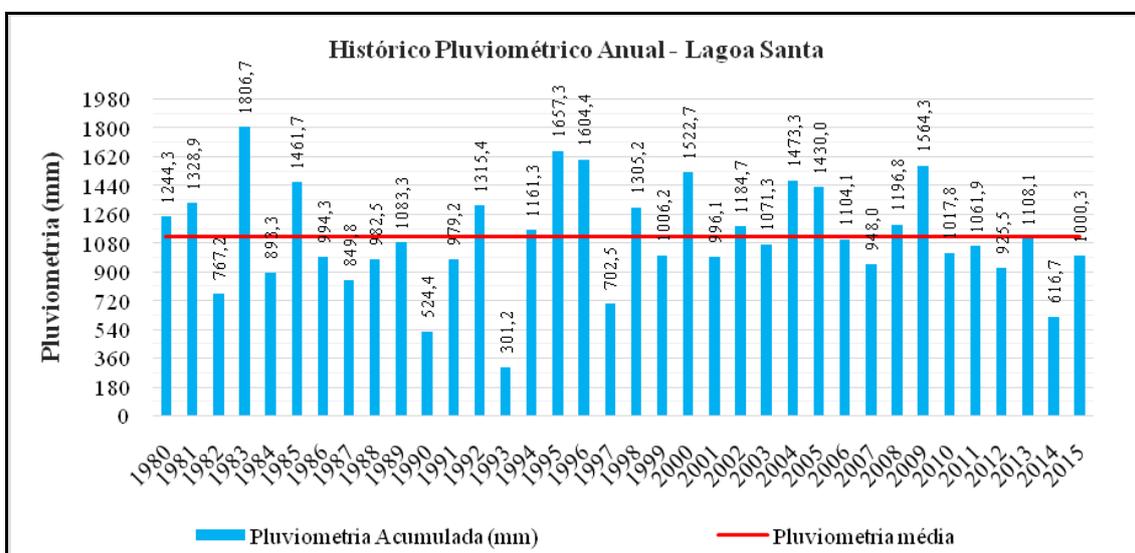
Fonte: ANA.



Fonte: INMET.



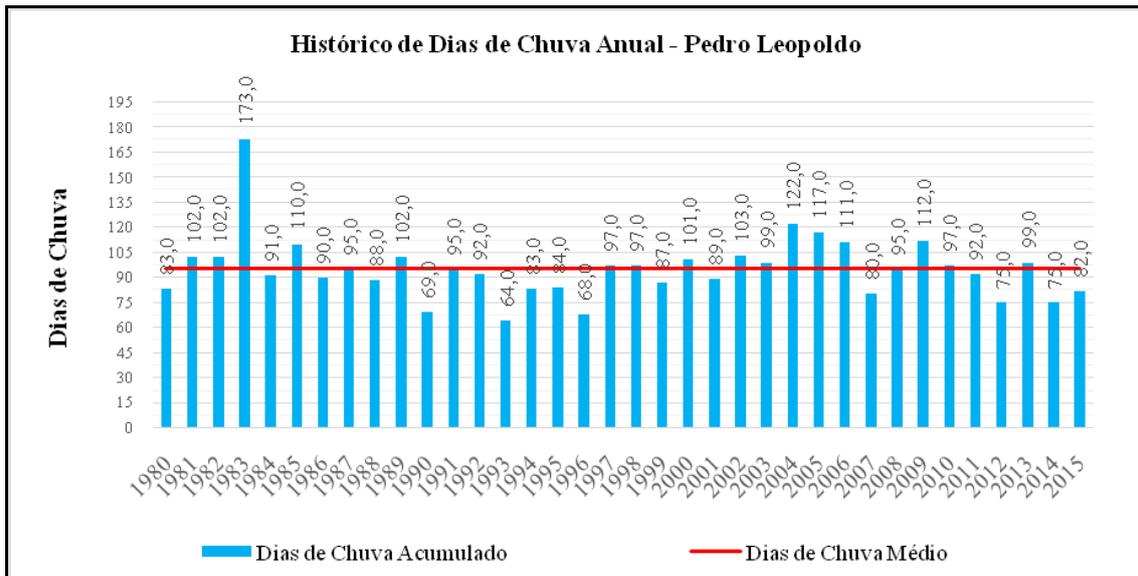
Fonte: ANA.



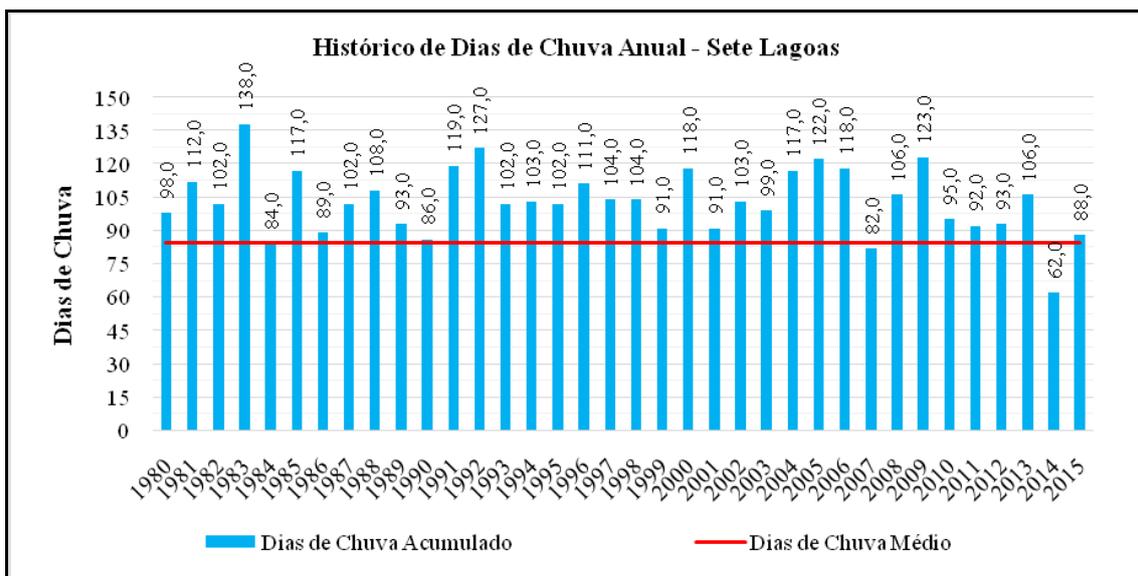
Fonte: ANA.

O subfator P_1 está ligado à distribuição temporal das chuvas e é indicativo, em certo período de tempo, da intensidade da precipitação. Para que este subfator fosse calculado foi utilizado, a partir dos anos úmidos, o número de dias de chuva (Figura 8.19). Quanto maior o total de chuva anual e menor o número de dias de chuva, maior será o valor de P_1 consequentemente, maior o escoamento em direção às feições cársticas que promovem a infiltração direta.

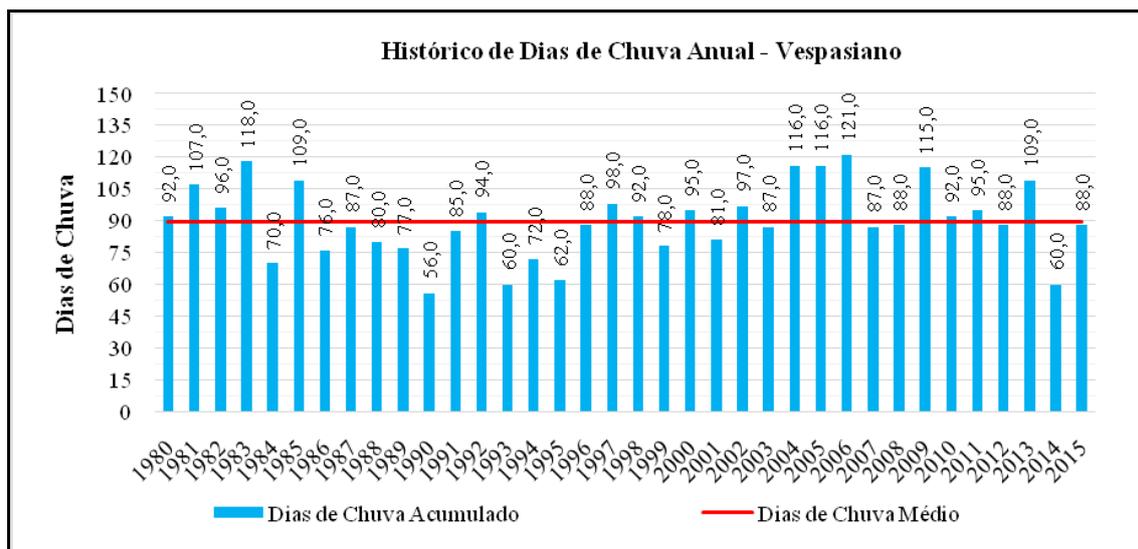
Figura 8.19 – Gráficos mostrando dias de chuva para série histórica.



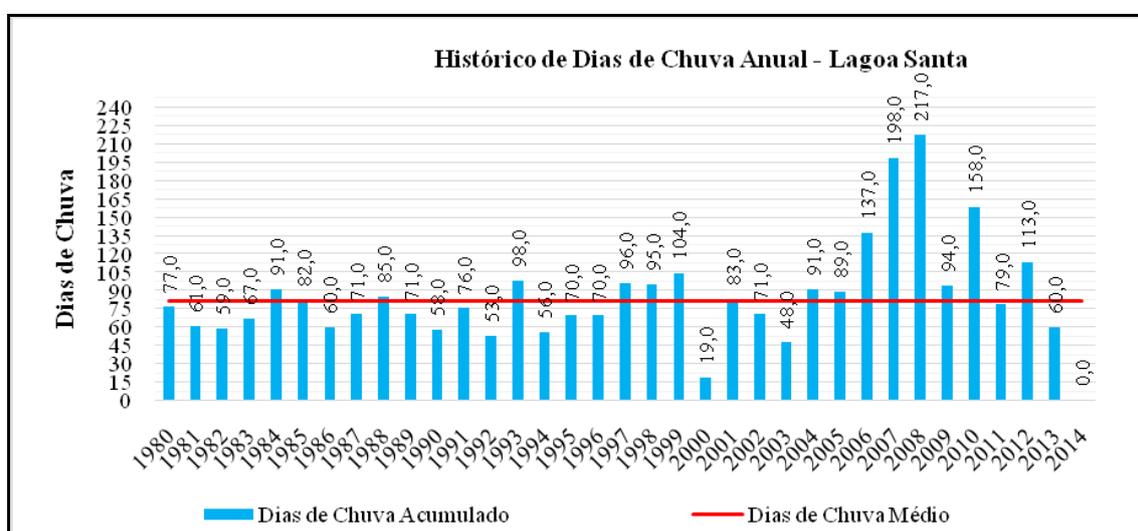
Fonte: ANA.



Fonte: INMET.



Fonte: ANA.



Fonte: ANA.

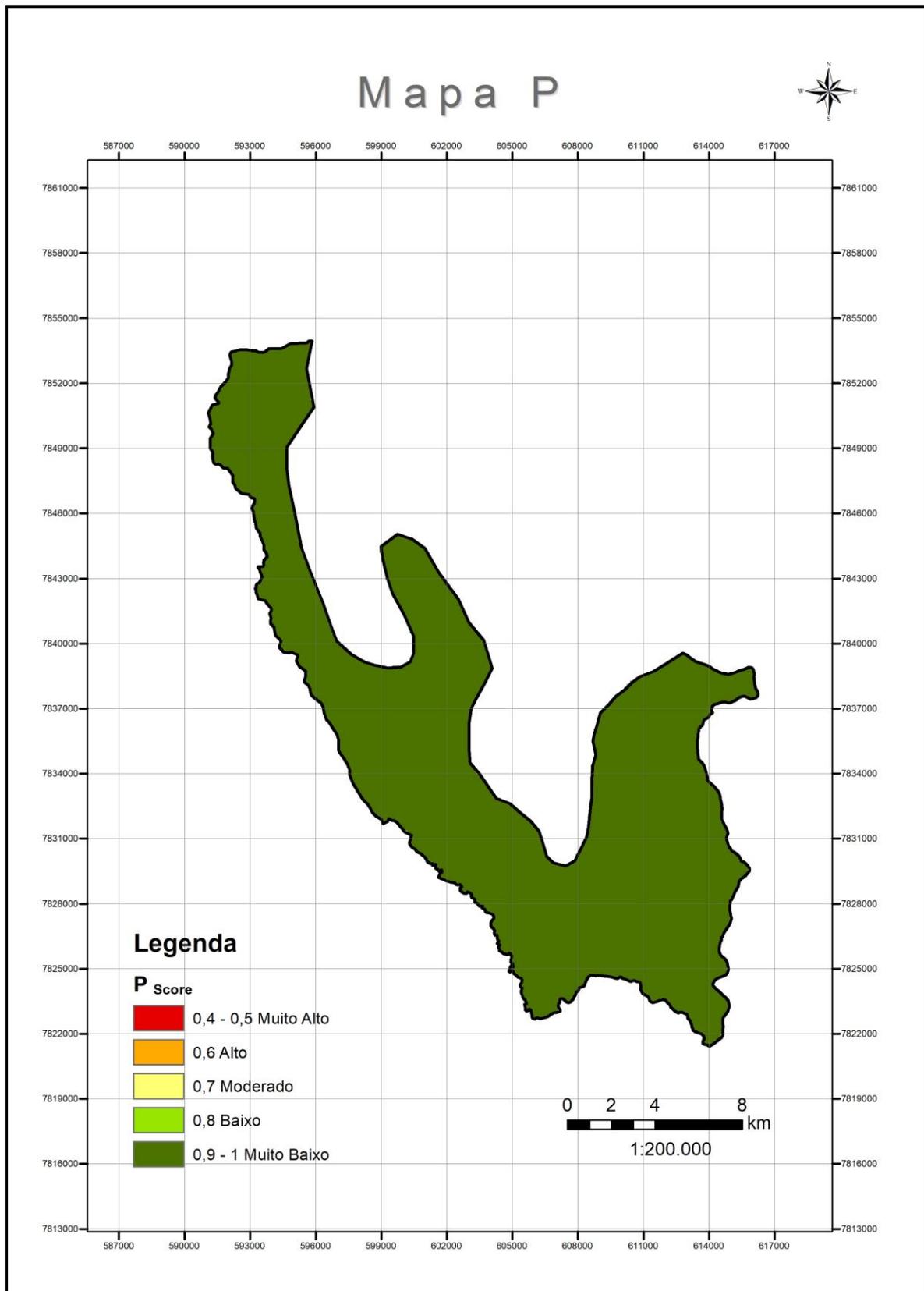
A partir dos dados apresentados, foram calculados os valores de P_Q , P_I e P_{SCORE} conforme apresentado na Tabela 8.6 .

Tabela 8.6 – Resultados de P_Q , P_I e P_{SCORE} .

Estação	Média Chuva Anos Úmidos (mm)	P_Q	P_I	P_{SCORE}
Pedro Leopoldo	1606,8	0,4	0,6	1
Lagoa Santa	1490,6	0,3	0,6	0,9
Vespasiano	1551,5	0,3	0,6	0,9
Sete Lagoas	1828,32	0,4	0,6	1

O mapa de P_{SCORE} (Figura 8.20) é apresentado a seguir.

Figura 8.20 – Mapa de PSCORE.



9. VULNERABILIDADE DA ÁREA ESTUDADA

Os resultados de vulnerabilidade apresentados nessa pesquisa mostraram que os objetivos propostos foram alcançados e responderam de forma clara a hipótese apresentada. Os mesmos demonstraram que as diferenças encontradas entre os carstes europeu e tropical, principalmente no que se refere à zona vadosa, restringem a aplicação direta da metodologia original ao carste tropical úmido e estão apresentados nas Figuras 9.1 e 9.2.

O fator O apresentou papel preponderante na proteção do aquífero, haja vista que o fator P não desempenhou papel importante na redução da proteção dada pelo Fator O. Já o Fator C influenciou pouco nos resultados, no método original devido as grandes espessuras de solo e material inconsolidado, revelando necessidade de ajustes a realidade tropical.

O método modificado mostrou um resultado muito mais próximo à realidade tropical úmida demonstrado pelos resultados, pelo fato de levar em consideração as principais características da zona vadosa que recobre o carste tropical. A simples simulação de espessuras maiores, revelada na simulação da extrapolação das espessuras em relação o método original, corrobora para esta análise haja vista que se aproximou mais da proteção oferecida pelo método modificado. Sendo assim, o papel da infiltração difusa, se revelou mais importante para o resto da área do que a infiltração direta. Isso se deve ao fato do carste ser majoritariamente encoberto, a área apresentar relevo suave desfavorecendo a concentração de fluxo via *runoff* e, a camada argilosa que recobre o carste não ser totalmente impermeável permitindo a infiltração de potenciais contaminantes. Esta última sendo satisfatoriamente preponderante na identificação de áreas de vulnerabilidade muito alta e alta aliada à espessura da zona vadosa, onde o método original foi incapaz de detectar por levar em consideração somente os parâmetros textura (maior que 30%) e profundidade (maior que 1,0m) bem distinta da realidade do carste tropical estudado. Conforme conceito apresentado por Civita (1997), a possibilidade de infiltração e percolação de líquidos ou soluções aquosas de contaminantes através da zona vadosa é o que define vulnerabilidade intrínseca. Essa característica se revelou importante no método modificado onde o IAN criado para adaptação do fator O se mostrou coerente à realidade do carste da área estudada.

Os resultados mostraram a necessidade de preservação dos maciços de calcário, haja vista serem estruturas que modificam de sobremaneira a proteção dada pelo fator O.

Durante o desenvolvimento da pesquisa constatou-se, a necessidade de adequação de alguns conceitos cársticos por detrás da metodologia que não são conhecidos no carste tropical brasileiro.

Figura 9.1 – Mapa de vulnerabilidade para o método original.

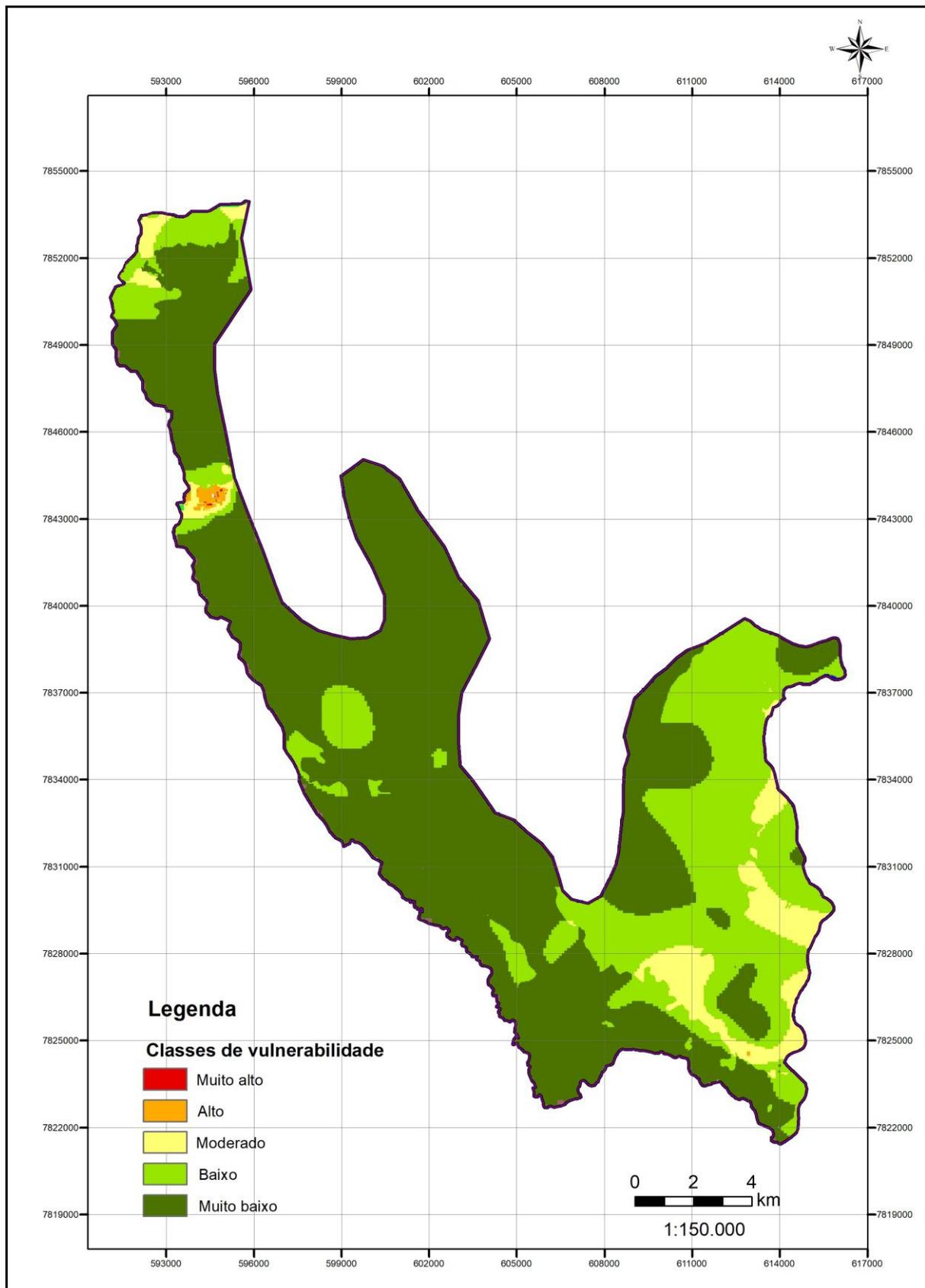
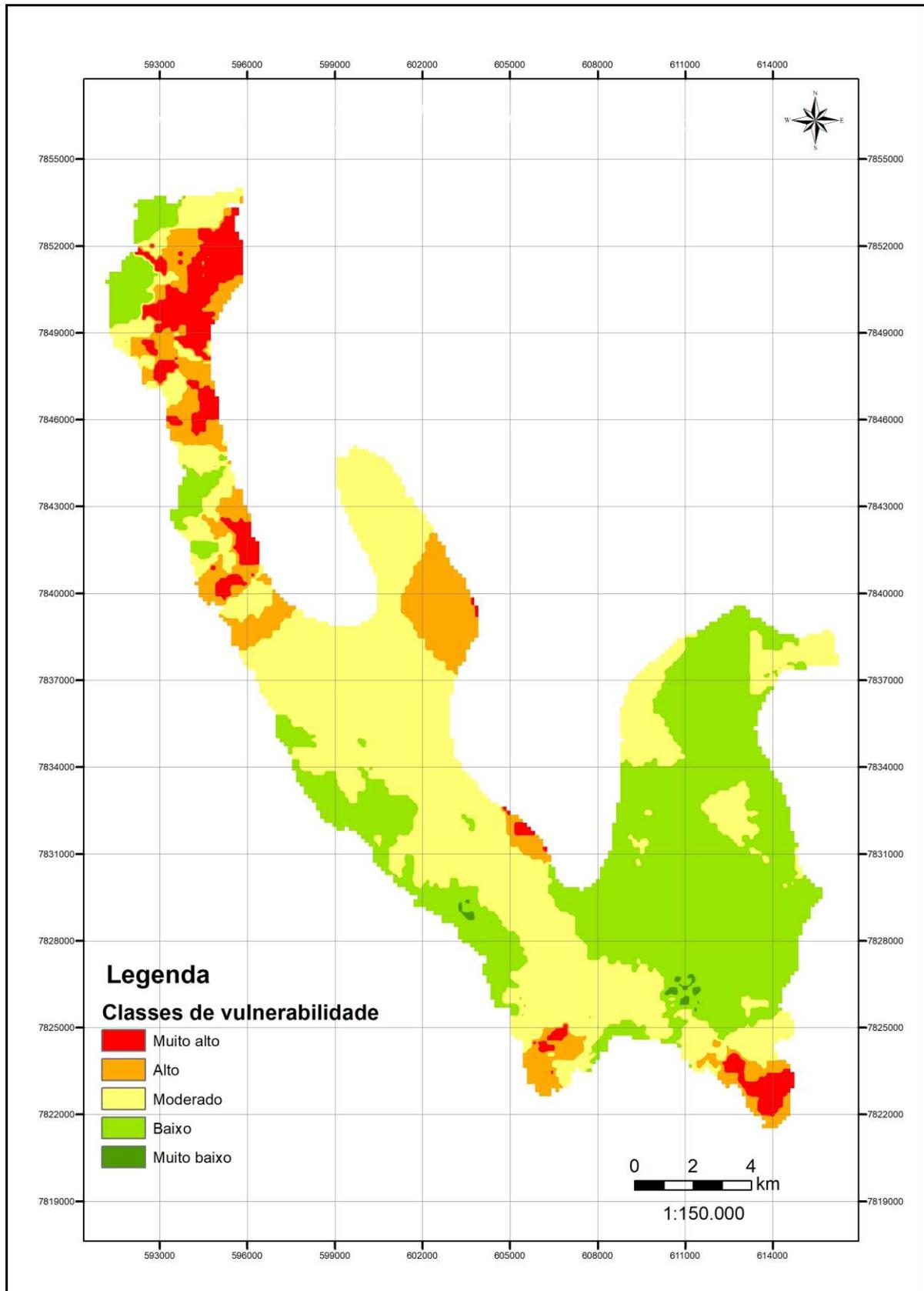
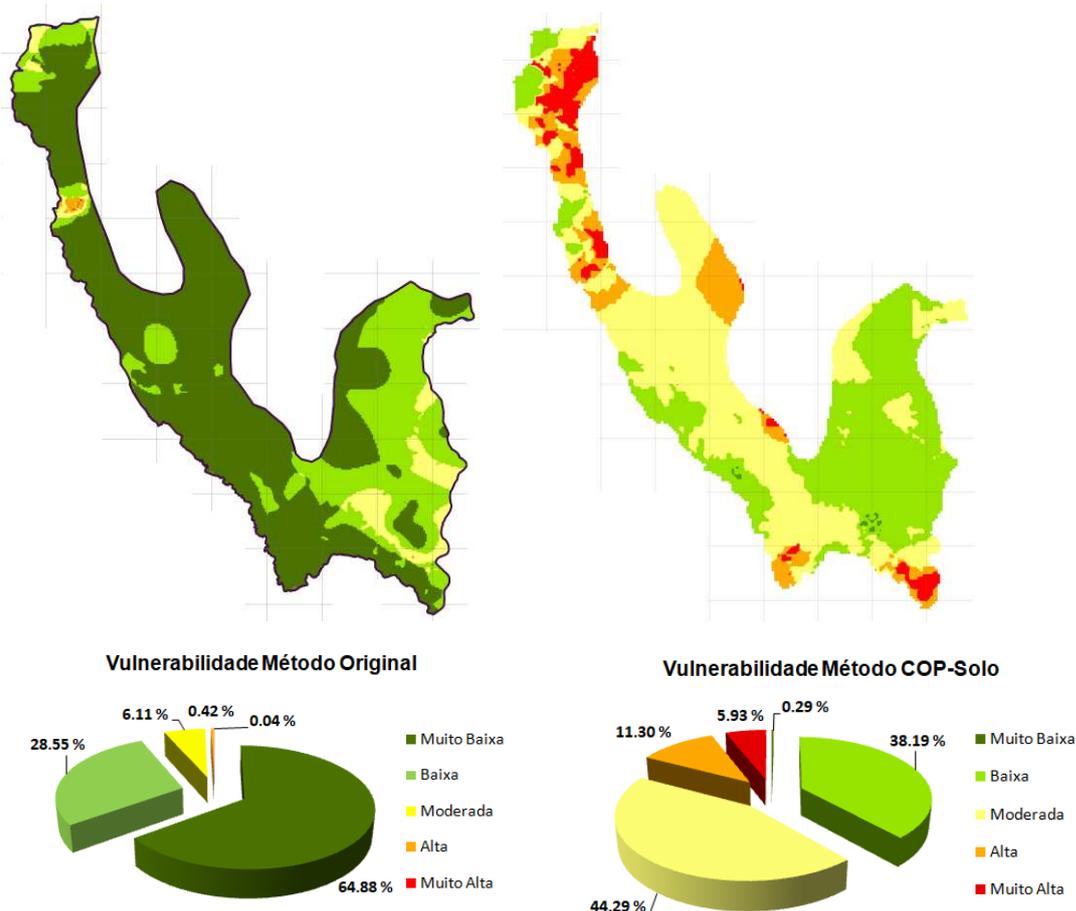


Figura 9.2 – Mapa de vulnerabilidade para o método COP-Solo.



A figura 9.3 faz uma comparação entre os dois métodos e mostra claramente a influência preponderante do fator O sobre os demais fatores para o carste tropical.

Figura 9.3 – Análise comparativa entre os métodos.



O IAN criado para conceber o método COP-Solo se mostrou adequado na detecção de áreas de mais alta vulnerabilidade, haja vista que considera parâmetros que diferem drasticamente do carste europeu, principalmente porque no carste tropical úmido o fator O é basicamente composto pelo subfator O_s em vez de $O_s + O_L$. Como era esperado, pela supervalorização dada pela metodologia original (por textura vs. espessura) leva a uma incongruência significativa haja vista que a área de estudo possui textura muito argilosa e espessura preponderantemente maior que 1,0 metro. Como o fator C apresentou um alto valor de redução, principalmente para os membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo este fator se mostrou como o principal modificador da proteção oferecido pelo fator O, na metodologia COP-Solo, dessa maneira conferindo

vulnerabilidades moderada e baixa em áreas com essa metodologia. Devido à supervalorização dada à camada protetora na metodologia original, o Fator C foi capaz de reduzir parte da área de proteção muito alta para vulnerabilidade alta e uma parcela muito pequena de moderada.

O método é baseado em SIG (Sistema de Informações Geográficas) e, portanto, o fator espacialização das áreas é de fundamental importância para tomadas de decisão, não se atendo somente ao tamanho das áreas, mas também à espacialização das mesmas.

As coberturas de solo e material inconsolidado que recobrem o membro Lagoa Santa são o principal fator que promove vulnerabilidade moderada, mesmo sendo essa representada pelo litotipo de maior carstificação. Isso demonstra a ineficiência do subfator O_L para o carste tropical, conforme já discutido anteriormente.

Mesmo levando as aproximações geológicas das estruturas encontradas na área de estudo, para cálculo do fator C, as mesmas não influenciaram sobremaneira na geoespacialização final das vulnerabilidades. Isso demonstra claramente o quanto outros fatores e conceitos associados à zona vadosa (como por exemplo o conceito de baixa condutividade hidráulica das argilas), bem como outros conceitos de hidrogeologia, não se aplicam a ela.

Em razão do carste tropical úmido apresentar espessuras muito superiores a 1,0 m (91,3% da área), o método original não detecta áreas dos extremos de vulnerabilidade, ou seja, de mais alta e alta vulnerabilidade. Nem mesmo onde há afloramento, devido ao processo de interpolação, a metodologia original nas áreas de maior espessura (região sul da área de estudo) não detectou áreas de muito alta e alta vulnerabilidade. Somente no extremo noroeste da área, onde as espessuras são menores, é que o método conseguiu detectar uma pequena área de vulnerabilidade muito alta e alta. Com isso, os resultados para as classes de menor vulnerabilidade apresentaram valores preponderantes na área de estudo. O método modificado conseguiu corrigir essa “anomalia” do método original quando aplicado ao carste tropical úmido, não só considerando a espessura e textura, mas principalmente devido às características peculiares dos solos tropicais que afetam diretamente os processos de infiltração.

10. CONCLUSÕES

- A pesquisa demonstrou que a aplicação da metodologia COP original em clima tropical úmido traz consigo inconsistências devido às características distintas do carste de clima tropical em relação ao carste de clima temperado mediterrâneo, não sendo recomendável a sua aplicação direta.
- As grandes espessuras apresentadas para o carste tropical úmido, fazem com que as classes muito baixa e baixa de vulnerabilidade sejam as preponderantes para o método original, isso porque profundidades acima de 1,0 m para o subfator O_s são recorrentes de serem encontradas no ambiente úmido tropical bem como a não observância de rocha calcária na zona vadosa superior a 250,0 m fazendo com que o subfator O_L perca relevância.
- Para o método original, o subfator litológico (O_L) é mais expressivo que o subfator solo (O_s), o que é o inverso no carste tropical da área estudada. Isso foi comprovado por meio dos resultados de vulnerabilidade apresentados, haja vista que o membro mais carstificado (Lagoa Santa) não apresentou vulnerabilidade alta (exceto onde há afloramento e onde foi detectada menor espessura de solo/material inconsolidado) devido este ser encoberto por espessas camadas desse material, apresentando dessa maneira vulnerabilidade preponderantemente baixa.
- A criação do IAN demonstrou aplicação satisfatória na criação do Fator O do método COP-Solo para o carste tropical, principalmente por abordar faixas de diferentes espessuras, além de outros parâmetros cruciais que distinguem fortemente as diferenças entre o carste tropical e mediterrâneo europeu. Isso foi demonstrado através da análise do fator C, onde mesmo apresentando preponderantemente um fator de redução alto para a área estudada, este fator teve pouca influência no mapa de vulnerabilidade original. Isso porque as áreas de alto fator de redução do fator O estão justamente em áreas de grandes espessuras de solo e material inconsolidado que recobrem o membro mais carstificado.
- A quantidade e qualidade dos dados têm que ser levada em consideração antes da escolha do método, pois é ela que dará a qualidade de saída (resultados) mais ou menos

confiáveis da metodologia proposta, o que somado às incertezas inerentes ao próprio método (principalmente no que se refere às metodologias de interpolação dos dados de entrada utilizados pelo *software ArcGIS*), significa que as cartas de vulnerabilidade têm que ser testadas em campo, por métodos de validação, para serem utilizadas com confiabilidade. Nesse sentido, o corte em 260 km², motivada pela escassez de dados, foi uma escolha acertada para manter um bom nível de interpretação dos resultados, corroborado por estarem fortemente associados ao fator O em detrimento dos demais fatores.

- Os métodos de validação disponíveis pela *COST 620* foram criados para a realidade do carste europeu e como este possui grandes diferenças se comparado ao carste tropical úmido, os mesmos necessitam serem criados para validação do método COP-Solo.

- O fator P afeta pouco ou quase nada a vulnerabilidade do aquífero na área de estudo, haja vista que características de diluição de potenciais contaminantes são mais importantes que o fator transporte. Com isso, este fator não influenciou os resultados de vulnerabilidade.

- O fator C, para o cenário 2, na metodologia original não foi capaz de mensurar satisfatoriamente a influência de depressões cársticas com presença de água no mapa de vulnerabilidade. Isto porque como não há um incremento de *runoff* na área estudada (devido a baixas declividades) e mesmo estando as depressões majoritariamente na feição mais carstificada, a presença de água nessas depressões não foi considerada como recarga direta para o aquífero e por isso essas depressões formam as lagoas na área estudada (considerando 0,75 para os cálculos – observação 2010 ano normal de pluviosidade). Esta conclusão é ratificada no mapa C, onde com um fator de redução preponderantemente alto, o mapa de vulnerabilidade na metodologia original para estas áreas apresentou vulnerabilidade preponderantemente baixa. Revelou-se aí que nessas áreas o fator O foi elemento determinante na vulnerabilidade e não o fator C. Já na metodologia COP-Solo, por apresentar faixas de espessuras distintas e por levar em consideração a condutividade hidráulica como fator importante na infiltração de potenciais contaminantes, houve uma mudança considerável da classe de vulnerabilidade.

- A baixa declividade do terreno propicia também uma elevada evapotranspiração (77%) na área de estudo, haja vista que somente 12% da precipitação recarrega o aquífero (De PAULA, 2019). A falta de evidência acentuada de *runoff* nas áreas de infiltração direta evidencia um importante papel da infiltração difusa na atenuação de potenciais contaminante.

- Os fatores C e P também devem ser levados em consideração na modificação da metodologia original devido a importantes configurações geomorfológicas encontradas no carste europeu mediterrâneo que não tem evidências similares no carste tropical. Essa observação levou a aproximações para aplicação do fator C, em relação à realidade do carste tropical, demonstrando que devem ser melhores estudadas.

- Alguns conceitos fundamentais criados para o carste europeu necessitam de ajustes para o correto entendimento e aplicação da metodologia para o cenário de carste tropical úmido. Isso demonstra mais um fator que corrobora para que a aplicação direta da metodologia levasse a aproximações fora da realidade em que a metodologia foi criada, consequentemente levando a uma interpretação distorcida por não existir similaridade.

- O desenvolvimento da metodologia por meio de *software* de geoprocessamento demonstrou durante a pesquisa que a ferramenta apropriada para solucionar os cálculos necessários até chegar o mapa de vulnerabilidade, representa um potencial risco de apresentar resultados inconsistentes com os dados utilizados. Nesse sentido, o desenvolvimento da tese em conjunto com o Grupo de Hidrogeologia da Universidad de Málaga (GHUMA), grupo este que criou a metodologia, foi de fundamental importância na correta confecção dos mapas de vulnerabilidade e profundo entendimento da metodologia e correta aplicação das ferramentas utilizadas pelo *software*.

- A proteção oferecida pelo fator O para o método original foi majoritariamente muito alta e alta e no método COP-Solo essa proteção gradou para majoritariamente moderada, principalmente quando analisado o comportamento da proteção a espessuras maiores. Vale à pena ressaltar que a cobertura muito argilosa que recobre o membro mais carstificado não promoveu uma vulnerabilidade baixa ou muito baixa, o que era de se esperar. Isso pode ser explicado pelo fato desta ideia levar em consideração que as argilas promovem uma baixa migração e infiltração de potenciais contaminantes porque

possuem uma condutividade hidráulica baixa (conceito generalizado aplicado à zona saturada que não pode ser aplicado à zona vadosa), aliado a um alto fator de redução de proteção ao aquífero apresentado pelo fator C.

- As áreas onde inexitem geofomas propícias à infiltração direta, mesmo que algumas delas não possuam espessuras tão acentuadas de zona vadosa, foram detectadas ao sul da área de estudo como vulnerabilidade baixa e muito baixa e estão associadas ao tipo de solo Gleissolo e fator de redução C baixo a muito baixo. Soma-se a essa análise que onde essa espessura é acentuada à classe de vulnerabilidade baixa a muito baixa na metodologia COP-Solo foi mantida, o que faz todo sentido pedológico e hidrogeológico.

- O método original, devido a espessuras de solo na zona vadosa normalmente superiores a 1,0 m, não foi capaz de detectar as diferenças inerentes às depressões cársticas como possíveis estruturas de infiltração direta, haja vista que nas áreas onde essas estruturas que contém água, a metodologia original as classificou com vulnerabilidade muito baixa. Contudo, devido às condutividades hidráulicas das coberturas argilosas sendo permeáveis e associadas a espessuras poucas representativas ($\leq 6,0$ m) de zona vadosa, onde há a presença dessas geofomas com essas características, o método modificado conseguiu classificar essas áreas como de muito alta a alta vulnerabilidade.

- Os afloramentos são áreas que requerem atenção especial dos gestores, haja vista que foram as áreas que proporcionaram as mais altas vulnerabilidades na área estudada, principalmente porque o fator O foi o que se mostrou mais importante neste estudo de vulnerabilidade com quase nenhuma interferência do fator P.

- O método original não foi capaz de detectar altas vulnerabilidades em áreas de acúmulo de água nas depressões com poucas espessuras de zona vadosa e onde o fator C apresentou alto poder de redução da camada protetora. Vale a pena ressaltar que depressões que acumularam água durante o período analisado e que não continham relação direta com afloramentos foram consideradas impermeáveis pela metodologia original, ou seja, o sumidouro não estava ativo. A metodologia original não foi capaz de detectar vulnerabilidades muito alta a alta para essas áreas. É lógico imaginar que essa

água não foi evaporada totalmente para não ser detectada pelo método original e, conseqüentemente não seria plausível avaliar que não houve nenhuma infiltração para o aquífero. O método COP-Solo demonstrou uma resposta satisfatória para essa situação, pontuando essas áreas de alta a muito alta vulnerabilidade, haja vista que o fator C é provedor de altas reduções na proteção do aquífero. Ademais, o método original leva em consideração somente os subfatores textura vs. espessura para mensurar esta proteção para o subfator O_s (menos importante para o carste europeu), onde as características dessa região da zona vadosa possui baixa representatividade de solo com argilominerais 2:1 e pH básico, o que desfavorece os processos de adsorção da hidroxila na superfície dos argilominerais e conseqüentemente há pouca melhora dos processos de infiltração em texturas com teor de argila maior que 30%. Em contrapartida, para o método COP-Solo, o subfator O_s é o mais importante, com a principal participação da presença de argilominerais 1:1 e pH ácido, favorecendo os processos de infiltração mesmo em texturas muito argilosas, por favorecer a adsorção de hidroxilas na superfície da caulinita melhorando a estruturação desse solo. Conclui-se que o método COP-Solo conseguiu alcançar uma abrangência de vulnerabilidade muito mais precisa que o método original para o carste tropical úmido, o que já era esperado.

- Mapas de vulnerabilidade trazem consigo uma margem de incerteza por representar uma simplificação da realidade, principalmente porque a disponibilidade de dados e a interpretação deles influenciam diretamente nos resultados obtidos.

- O estudo demonstrou que para área tropical úmida de carste encoberto, as características físicas e químicas do solo e material inconsolidado têm que ser levadas em consideração (atenuação natural) para que não haja uma mensuração equivocada das áreas de vulnerabilidade, principalmente aquelas de alta e muito alta vulnerabilidade.

11. REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, W.A.P.; MARQUES, J.J. **Manual de coleta de solos para valores de referência de qualidade no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2013. 9, 12, 13 p.

Agência Embrapa de Informação Tecnológica-AGEITEC. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_56_2212200611552.html>. Acesso em: 25 dez. 2017.

ALLER, *et al.*, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Ohio, 1987. 35-62 p.

ALEY, T. A model for relating land use and groundwater quality in southern Missouri. . In: _____. **Dilamarter, R. R. and Csallany, S. C., (eds.): Hydrologic problems in karst regions: Bowling Green**, Western Kentucky University, 1977. p. 323-332.

ALMEIDA, Tania Leme de. **Implicações ambientais dos processos de atenuação de lixiviado em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos. 2009**. 26-28f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ALVAREZ, Roberto. **Matéria orgânica: valor agronômico y dinámica en suelos pampeanos**. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía de Buenos Aires, 2006.

AMARAL, D.G.P. **Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste de Lagoa Santa (MG)**. 2018. 30, 33, 43, 47, 52, 82, 84, 113, 114 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

AMERICAN Petroleum Institute. **API interactive LNAPL guide version 2.0**. Developed by environmental system and technologies (A division of groundwater & environmental services, Inc.). Virginia, jul. 2004.

AULER, A.S. **Hydrogeological and hydrochemical characterization of Matozinhos-Pedro Leopoldo karst, Brazil**. 1994. 19, 20 f. Thesis – Faculty of the Department of Geography and Geology, Western Kentucky University, Kentucky, 1994.

AULER, A. S. **Histórico, ocorrência e potencial de cavernas no Brasil**. In: Rubbioli, E. L.; Auler, A. S.; Menin, D. S.; Brandi, R. (Eds). Editora IABS: Brasília, Atlas do Brasil Subterrâneo, 2019.

AZEVEDO, Mariana Ferreira Carriconde de. **Estudo do parâmetro solo nos métodos para determinação de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos em regiões tropicais**. 2018. ivf. Dissertação – Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

BERBERT-BORN, M.; SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M. Carste de Lagoa Santa – berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In:_____. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil (SIGEP)**, 1. ed. Brasília: DNPM /CPRM , 2002. p. 415-430.

BOCKHEIM, J. G. Historical development of key concepts in pedology. **Geoderma**, n. 124, p. 23-36, 2005.

BOULET, René *et al.*, Uma evolução recente da pedologia e suas aplicações no conhecimento da gênese do relevo. In: 3º Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 1992, Belo Horizonte. **Anais III Congresso...**Belo Horizonte: ABEQUA, 1992. p. 59, 60, 61.

BRADY, C. Nyle; WEIL, Ray R.. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman., 2013.

CABRAL, Jayme Álvaro de Lima. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Vida: Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental**. Belo Horizonte, 1994. 23, 24 p. v.3.

CAMARGO *et al.*, Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. **Boletim Técnico, 106 – Campinas**, São Paulo, ed. rev. e atual, p. 1-77, nov. 2009.

CAO, Xingxing; WU, Pan; CAO, Zhenxing. Element geochemical characteristics of a soil profile developed on dolostone in central Guizhou, southern China: implications for parent materials. **Acta Geochim**, Berlin Heidelberg, v. 35, n. 4, p. 445-662, 2016.

CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS-CETEC. **Caracterização Pedológica da Região de Sete Lagoas-Lagoa Santa**. Belo Horizonte, 1994. 7,8 p.

CIVITA, M. Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Teoria e pratica [Aquifer vulnerability map to pollution. Theory and application]. **Pitagora**, Bologna, v.13, p. 325, 1994.

CIVITA, M.; De Maio, M. SINTACS Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, Metodologia e automazione. **Pitagora**, Bologna, 1997.

Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação, 1999.

CONEJO, João G. L. *et al.*, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil**, 2007. 64 p.

CONTI, Marta E.; GIUFFRÉ, Lidia. **Edafología, bases y aplicaciones ambientales argentinas**. 2 ed. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía de Buenos Aires, 2014.

DALY, D.; DESSARGUES, A.; DREW, D.; DUNNE, S.; GOLDSCHIEDER, N.; NEAL, S.; POPESCU, I. C.; ZWALEN, F. Main concepts of the “European Approach” to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p. 340-345, 2002.

DANNY, Dalberson de Oliveira *et al.*, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Atlas Brasil:** abastecimento urbano de água: panorama nacional. Brasília, 2010. 34 p.

DOERFLIGER, N.; JEANNIN, P.Y., ZWAHLEN, F. 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**, v. 39, n. 2, p. 165-176, 1999.

DOMENICO, Patrick A.; SCHWARTZ, Franklin W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

DUNNE, Suzanne. **Vulnerability mapping for the protection of karst aquifers in England and Wales** . 2003. Thesis – Departament of Geography, Trinity College. Dublin University, Dublin, 2003.

DURN, Goran. Terra Rossa in the Mediterranean Region: parent materials, composition and origin. **Geologia Croatia**, v. 56, p. 83-100, 2003.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A., 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. **Ground Water Monitoring Rev.**, v. 9, n. 3, p. 184-193,

ESSINGTON, Michael E. **Soil and Water Chemistry: an integrative approach**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2005.

FASSBENDER, Hans W.; BORNEMISZA, Elemer. **Química de suelos de América Latina**. 2 ed. San José: Instituto Interamericano de Cooperacion Para La Agricultura. Servicio Editorial IICA, 1994.

FENG, Jin-Liang; CUI, Zhi-Jiu; ZHU, Li-Ping, 2008. Origin of terra rossa over dolomite on the Yunnan-Guizhou Plateau, China. **Geochimical Journal**, v. 43, p. 151-166, 2008.

FORD, Derek; WILLIAMS, Paul. **Karst hidrogeology and geomorphology**. Rev. ed. West Sussex: John and Wiley and Sons, Ltd, 2007.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. WHO-Pan American Health Organization. Lima: Environmental Health Program-HPE, 1988.

FRITZSONS, E.; RIZZI, N.; BITTENCOURT, A. V. L.; MANTOVANI, L. E. Estudo do impacto da contaminação por nitrogênio numa bacia hidrográfica cárstica. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 49, p. 39-52, 2001.

GALVÃO, Paulo Henrique Ferreira. **Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas**. 2015. vi f. Tese (Doutorado em recursos minerais e hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GOLDSCHIEDER, N.; KLUTE, M.; STURM, S.; HÖTZL, H. The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. **Zeitschrift für angewandte Geologie**, v. 46, p. 157-166, 2000.

GOLDSCHIEDER, Nico.; CHEN, Zhao, AULER, Augusto S.; BAKALOWICZ, Michel; BRODA, Stefan; DREW, David; HARTMANN, Jens; JIANG, Guanghui; MOOSDORF, Nils; STEVANOVIC, Zoran; VENI, George. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources. **Hydrogeology Journal**, v. 28, p. 1661-1677, 2020.

GONÇALVES, José Augusto Costa. **A contaminação natural por arsênio em solos e águas subterrâneas na área urbana de Ouro Preto (MG)**. 2011. 19, 20f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

GUERRERO, G. Paneque; GOMÉZ, J. L. Mudarra. Morfología, sistemática y cartografía de los suelos de Andalucía Occidental. **Anales de Edafología y Agrobiología**, p. 417-440, 1966.

GUNN, John. A conceptual model for conduit flow dominate karst aquifers. **Karst Water Resources (Proceedings of the Ankara – Antalya Symposium)**, v. 161, 1985.

HAIR, Joseph F. Jr; BLACK, William C; BARRY, J. Babin; ANDERSON, Rolph E.; TATHAM, Ronald L. **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HEREDIA, Olga Susana; CIRELLI FERNÁNDEZ, Alicia. Groundwater chemical pollution risk: assessment through a soil attenuation index. **Environment Geology**, n. 58, p. 1345-1351, 2008.

HERRMANN, Gisela *et al.*, COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Apa Carste de Lagoa Santa: zoneamento ambiental**. Belo Horizonte, 1998. 2,8,9 p.

JI, Hongbing *et al.*, Geochemistry of red residua underlying dolomites in karst terrains of Yunnan-Guizhou Plateau I. The formation of the Pingba profile. **Chemical Geology**, n. 203, p. 1-27, 2004.

JONES, William K. The nature of the epikarst zone. **Acta Carsologica**, v. 42, p. 2-3, 2013.

KER, João Carlos. Latossolos do Brasil: uma revisão. **GEONOMOS**, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1997.

KLIMCHOUK, Alexander. The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis. **Speleogenesis evolution of karst aquifer. National Speleological Society**. p. 91-99, 2000.

KOHLER, H. C. Geomorfologia Cárstica. In: _____ **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 309 - 334.

LIMA, Erica Souto Abreu *et al.*, Absorção de bário por plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) e mobilidade em solo tratado com baritina sob diferentes condições de potencial redox. **Quim. Nova**, n. 9, v. 35, p. 1746-1751, 2012.

LINDSAY, Willard L. **Chemical equilibria in soils**. Fort Collins: John Wiley & Sons, 1979.

MAGALHÃES, Márcio Osvaldo Lima *et al.*, Mobilidade de bário em solo tratado com sulfato de bário sob condição de oxidação e redução. **Quim. Nova**, v. 34, n. 9, p. 1544-1549, 2011.

MANAHAN, Stanley E. **Fundamentals of Environmental Chemistry**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.

MARTIN, Jonathan B. Martin, WHITE, William B. **Frontiers of Karst Research- Proceedings and recommendations of workshop**. San Antonio, Texas, USA. 2008.

MARTINEZ, Jesús Maria Vías. **Desarrollo metodológico para la estimación y cartografía del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas mediante SIG. Aplicación en acuíferos del sur de España**. 2005. 52 f. Tesis Doctoral – Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Málaga, Málaga, 2005.

MARTÍNEZ, M.I. **Estratigrafia e tectônica do grupo bambuí no norte do estado de Minas Gerais**. 2007. 26 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MATOS, A.T. *et al.*, Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. **Environmental pollution**, Oxford, v. 111, p. 429-435, 2001.

MEGIA, Miguel Villalobos; MUÑOZ, Ana B. Pérez. Geodiversidad y Patrimonio Geológico de Andalucía, Itinerario Geológico por Andalucía, Guía Didáctica de Campo. **Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía**, p. 17-325, 2006.

MELO, Vander de Freitas; ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú. **Química e mineralogia do solo, parte II**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009.

MENESES, I.C.R.R.C. **Análise geossistêmica na área de proteção ambiental (APA) carste de Lagoa Santa, MG**. 2003. 16, 92 f. Dissertação (Mestrado em Tratamento da Informação Espacial) – Instituto de Ciências Humanas, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

MERKEL, Broder J.; PLANER-FRIEDRICH, Britta. **Groundwater Geochemistry-A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems**. 2. ed. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.

Natural Resources Conservation Services Soils, USDA-United States Department of Agriculture. Disponível em:
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167>. Acesso em: 23 dez. 2017.

NOSSA, T.C.B. **Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre-Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP**. 2011. 110 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

OLIVEIRA, Luiz Antônio; GONÇALVES, Renata Moreira; MARTINS, Fernanda Pereira. Contraste de condutividade hidráulica em solos de textura arenosa e argilosa encontrada nos tributários da margem esquerda do rio Tijuco, município de Ituiutaba, Estado de Minas Gerais, Brasil. **CAMINHOS DE GEOGRAFIA**, v. 11, n. 33, p. 230-243, 2010.

PAGANO, Eduardo Antonio. **Impacto en el ambiente de los agroquímicos utilizados en cultivos transgénicos y evaluación de la exposición en población rural de la Región Pampeana, Argentina**. Buenos Aires: Grupo Editor Latinoamericano S.R.L., 2018.

DE PAULA, R.S. **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG.** 2019. 131, 133 f. Tese (Doutorado em Geologia: área de concentração Geologia Econômica e Aplicada) – Instituto de Geociências-IGC, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

PEREIRA, M. C. **O carste sob os olhares da superfície: fragilidade, antropismo e planejamentos urbanos e ambiental na região cárstica de Lagoa Santa - MG.** 2018. 79 f. Tese (Doutorado em Análise Ambiental) – Departamento de Geografia, Instituto de Geociências-IGC, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

PERRIN, J.; POCHON, A.; JEANNIN, P. Y.; ZWAHLEN, F. Vulnerability assessment in karstic areas: validation by field experiments. **Environmental Geology**, v. 46, n. 2, p. 237-245, 2004.

PESSOA, P.F.P. **Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas-MG: potencialidades e riscos.** 1996. 47, 48 f. Dissertação (Mestrado em recursos minerais e hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

PESSOA, P.F.P. **Hidrogeologia dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa, MG.** 2005. 86, 310 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-DESA, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

PILÓ, Luís B. Geomorfologia cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, n. 1, p. 88-102, 2000.

POLEMIO, M.; CASARANO, D., LIMONI, P. P. Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, southern Italy). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, p. 1461-1470, 2009.

Prescription Soil Analysis, LLC. Disponível em: <<https://www.prescriptionsoilanalysis.com/>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

RAIJ, Bernardo Van. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. **Bragantia – Boletim Científico do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo**, Campinas, v. 28, n. 8, p. 1,2, 1969.

RAVBAR, Natasa; GOLDSCHIDER, Nico, 2009. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene Karst catchment. **Hydrogeology Journal**, v.3, p. 725-733, 2009.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph Permeameter. **Soil Science**, v. 140, n. 4, p. 292-302, 1985.

RIBEIRO, C.G., VELÁSQUEZ, L.N.M., PAULA, R.S., MEIRELES, C.G., LOPES, N.H.B, ARCOS, R.E.C., AMARAL, D.G.P. Análise de fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. **Revista Águas Subterrâneas**, n. 1, v.33, p. 12-21, 2019.

RODRIGUEZ, J. L. Perez; MARTINEZ, F. Martin. Estudio por espectrografia de infrarrojo de las arcillas de algunos suelos de Andalucía Occidental. **Anales de Edafología y Agrobiología**, p. 1069-1079, 1966.

RODRIGUEZ, Roger Rivas. Caracterización de los suelos de la zona de Fuentes de Andalucía (Sevilla-España). **Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología**. XXVI Curso Internacional de Edafología y Biología Vegetal, p. 1-23, 1989.

SALGADO, J.R.P. **Condicionamento estrutural e litológica porosidade cárstica da Formação Sete Lagoas, município de Sete Lagoas (MG)**. 2016. 66, f. Dissertação (Mestrado em recursos minerais e hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SANTOS *et al.*, EMBRAPA - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Distrito Federal, Brasília, 2018. 68, 72, 73, 76, 113-116, 119-124, p. 2018.

SANTOS *et al.*, Determinação experimental do coeficiente de distribuição (K_d) de Chumbo e Bário em solos da região semiárida do estado da Bahia. *In:*

INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC, 2013, Recife. Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN, 2013. p. 24-29.

SANTOS *et al.*, **Manual de descrição de coleta de solo no campo**. Viçosa, 2005, 5^a ed. 6, 7 p.

SELKER, John S.; KELLER, C. Kent; McCORD, James T. **Vadose zone processes**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

SHINZATO, E. **O carste da área de proteção ambiental de Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação dos solos**. 1998. 35 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 1998.

SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. Operating instructions. Model 2800K1. Guelph Permeameter, Santa Barbara, CA, USA, 2008.

SOUSA, Ildeu Laborne A. *et al.*, FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS/CETEC. **Diagnóstico Ambiental do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 1983. 31 p.

SOUSA, Marcelo R. *et al.*, A simple method to assess unsaturated zone time lag in the travel time from ground surface to receptor. **Journal of Contaminant Hydrology**, n. 144, p. 138-151, 2013.

SOUZA, Rogério Tadeu; HEREDIA, Olga Susana; TRAVASSOS, Luiz E. Panisset; VELÁSQUEZ, Leila N. M; SAMPAIO, Jarbas L. Dias. Influência da espessura da camada de solo na proteção dos aquíferos cársticos sob os climas tropical úmido e europeu Mediterrâneo, pelo método de vulnerabilidade COP. **Revista Águas Subterrâneas**, n. 1 v. 34, p. 50-65, 2020.

SOUZA, Rogério T.; VELÁSQUEZ, Leila N. M.; HEREDIA, Olga S. Diferencias encontradas en la aplicación del parâmetro “Capa Superpuesta – O” del método COP em país tropical-Brasil: definición de la zona vadosa. In: XIII Congresso de Geología,

VIII Convención de Ciencias de la Tierra de La Sociedad Cubana de Geología, 2019, La Habana. **Anais XIII Congreso y VIII Convención de Ciencias de la Tierra...**La Habana: SCG, 2019. p. 204.

TANNÚS, Marcos B. *et al.*, CETEC/CPRM. **Projeto Vida-Characterização Pedológica**: série cartas temáticas, volume 2. Belo Horizonte, 1994. 49-103 p.

TANNÚS, Marcos B. *et al.*, FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS/CETEC. **Estudos Ambientais na Região Cárstica de Lagoa Santa-Sete Lagoas**: caracterização pedológica. Belo Horizonte, 1992. 73-106 p.

TEODORO, Maria Isabel; VELÁSQUEZ, Leila N. M; FLEMING, Peter Marshall, PAULA, Rodrigo Sérgio; SOUZA, Rogério Tadeu; DOI, Bruno Mamoro. Hidrodinâmica do sistema aquífero cárstico Bambuí, com uso de traçadores corantes, na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Revista Águas Subterrâneas**, n. 4 v. 33, p. 392-406, 2019.

TOSCANO, H. Indiana Department of Environmental Management – Office of Land Quality – **GUIDANCE – Determine the Fraction of Organic Carbon RISC Nondefault Option** . OLQ-General ID-0119. Indianapolis, 2007.

TRČEK, Branka. How can the epikarst zone influence the karst aquifer hydraulic behaviour? **Environmental Geology**, v. 51, p. 761-765, 2007.

TRIPET, Jean-Pierre *et al.*, Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland. **Acta Carsologica**, v. 29, p. 164-171, 2000.

U.S. Geological Survey. **Geochemical and Mineralogical Data for Soils of the Conterminous United States**. Data Series 801, appendix 1. Virginia, 2013.

VAN STEMPOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. Aquifer vulnerability index: a GIS – compatible method for groundwater vulnerability mapping. **Canadian Water Resources Journal** , v. 18, n. 1, p. 25-37, 1993.

VERHEYE, Willy.; De La ROSA, Diego. Mediterranean soils. In: UNESCO. **Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)**. Oxford: Eolss Publishers, 2005. Cap. 1.5

VIANA, Haroldo S. *et al.*, COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Apa Carste de Lagoa Santa: meio físico**. Belo Horizonte, 1998. 28, 95 p.

VÍAS, J.M.; ANDREO, B.; RAVBAR, N.; HOTZL, H. Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 1500-1510, 2010.

VÍAS, J.M.; ANDREO, B.; PERLES, M.J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I.; JIMÉNEZ, P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. **Hydrogeology Journal**, v. 14, p. 912-925, 2006.

VIEIRA, Lúcio Salgado. **Manual da ciência do solo – com ênfase aos solos tropicais**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1988, p.8.

WILLIAM, Paul W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. **Journal of Hidrology**, v. 61, p. 45-67, 1983.

ZWAHLEN, F. *et al.*, **Vulnerability and risking map for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final Report**. Brussels: European Commission COST Action 620, Directorate-General Science, Research and Development, 2004.

**ANEXO 1 – Ficha de campo das amostras de solo utilizadas na
construção do IAN**

**FORMULÁRIO DE CAMPO**

1. Identificação da amostra: Ponto 03
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 600066 E / 7842454 N
4. Data da coleta: 25.07.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Diógenes
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pastagem
10. Cor: 2,5 YR 3/6
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 04
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 601300 E / 7839540 N
4. Data da coleta: 25.07.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Diógenes
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pastagem
10. Cor: 2,5 YR $\frac{3}{4}$
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 05
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 592479 E / 7852927 N
4. Data da coleta: 29.07.2017
5. Condições climáticas: tempo nublado.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Diego
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pastagem
10. Cor: 2,5 YR 5/4
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 18
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 591842 E / 7849651 N
4. Data da coleta: 28.07.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Diego
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pastagem
10. Cor: 2,5 YR 5/4
11. Textura: Arenosiltoso



1. Identificação da amostra: Ponto 19
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 594650 E / 7848507 N
4. Data da coleta: 26.07.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Diógenes
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pastagem
10. Cor: 10R 4/8
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 20
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 593429 E / 7847266 N
4. Data da coleta: 26.07.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Diógenes
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pastagem
10. Cor: 2,5 YR 3/6
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 30
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 594186 E / 7844560 N
4. Data da coleta: 28.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Cerrado/Pasto Sujo
10. Cor: 2,5 YR 3/4
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 31
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 594422 E / 7841433 N
4. Data da coleta: 28.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto Sujo
10. Cor: 2,5 YR 3/6
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 37
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 615047E / 7837978 N
4. Data da coleta: 19.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto
10. Cor: 2,5 YR 4/8
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 38
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 613307 E/ 7838298 N
4. Data da coleta: 19.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto Sujo
10. Cor: 2,5 YR 3/6
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 42
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 599571 E/ 7837946 N
4. Data da coleta: 08.08.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Fred / Diógenes
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto Sujo
10. Cor: 7,5 YR 4/6
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 44
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 600149 E / 7834899 N
4. Data da coleta: 08.08.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Fred / Diógenes
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto
10. Cor: 2,5 YR 3/4
11. Textura: Siltoarenoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 47
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 608995 E / 7834851N
4. Data da coleta: 13.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto
10. Cor: 10R 3/6
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 48
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 613265 E / 7833707 N
4. Data da coleta: 14.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto Sujo
10. Cor: 7,5 YR 5/8
11. Textura: Siltoarenoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 49
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 611583 E / 7832839 N
4. Data da coleta: 14.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):

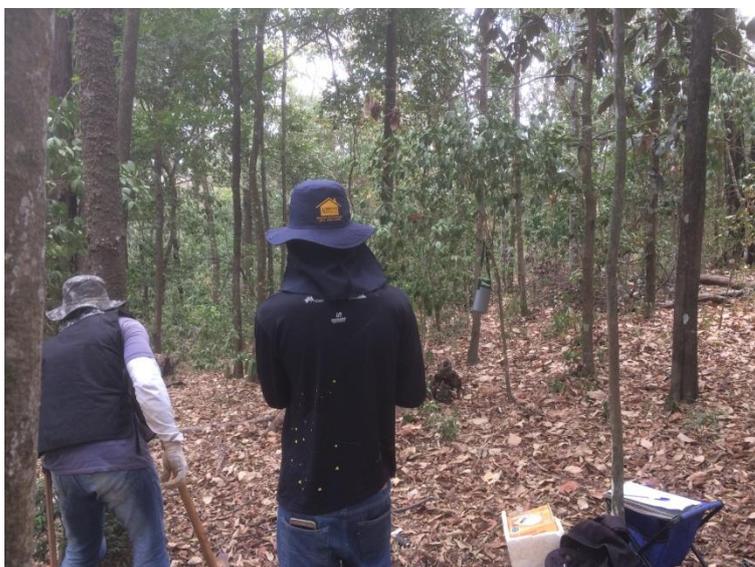


9. Uso da terra: Pasto
10. Cor: 10R 3/6
11. Textura: Siltoarenoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 51
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 611273 E / 7825156 N
4. Data da coleta: 20.09.2017
5. Condições climáticas: nublado.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Mata
10. Cor: 7,5 YR 5/8
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 52
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 608294 E / 7826641 N
4. Data da coleta: 22.09.2017
5. Condições climáticas: nublado.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto Queimado
10. Cor: 2,5 YR 3/6
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 53
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: E / N
4. Data da coleta: 10.10.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Mata
10. Cor: 7,5 YR 4/6
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 54
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 603254 E / 7829344 N
4. Data da coleta: 21.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Mata
10. Cor: 10 YR 3/6
11. Textura: Arenosiltoso

Adaptado de USGS Soil Sampling Manual for The North American Soil Geochemical Landscapes project 2013



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 55
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 601564 E / 7831399 N
4. Data da coleta: 21.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Mata
10. Cor: 2,5 YR 3/6
11. Textura: Arenosiltoso

Adaptado de USGS Soil Sampling Manual for The North American Soil Geochemical Landscapes project 2013



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 56
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 604231 E / 7831960 N
4. Data da coleta: 20.09.2017
5. Condições climáticas: nublado.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto
10. Cor: 2,5 YR 3/6
11. Textura: Arenosiltoso

Adaptado de USGS Soil Sampling Manual for The North American Soil Geochemical Landscapes project 2013



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 58
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 609766 E / 7831738 N
4. Data da coleta: 15.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto
10. Cor: 2,5 YR 4/6
11. Textura: Arenosiltoso



FORMULÁRIO DE CAMPO

1. Identificação da amostra: Ponto 60
2. Datum: WGS84
3. Coordenadas UTM: 605728 E / 7827779 N
4. Data da coleta: 21.09.2017
5. Condições climáticas: tempo bom com sol.
6. Umidade do solo: () úmido (X) seco () molhado, não saturado
() molhado e saturado-escorrendo água
7. Membros da equipe: Rogério / Maurício / Nicolás
8. Foto do Ponto (Paisagem):



9. Uso da terra: Pasto
10. Cor: 2,5 YR 3/6
11. Textura: Arenosiltoso

ANEXO 2 – Características dos solos do sul da Espanha

Características dos solos de Andalucia.

Geologia/Local	Classificação/Descrição	Perfil de Solo							
		Horizonte A (cm)	Descrição	Horizonte B (cm)	Descrição	Horizonte C (cm)	Descrição	Horizonte D (cm)	Descrição
Calcários brechóides/Córdoba	Terra rossa/Áreas rochosas e acidentadas descobertas pela erosão, constituída por grandes maciços calcários. Onde o solo se desenvolve tem caráter de rendsina e protorendsina.	0 – 10	Cor: pardo amarronzado (5YR 4/40), argiloso, estrutura granular média, bem desenvolvido, algo firme, algo compacto, permeável, sem carbonato de cálcio apreciável, moderadamente orgânico, raízes finas, boa atividade biológica, limite gradual e regular.	10-50	Cor: vermelho amarelado (5YR 5/6), argiloso, estrutura poliédrica subangular média, bem desenvolvida, firme, compacto, permeável, não calcárico, limite abrupto e descontínuo.	50	Calcário cinza amarelado (2,5 Y 7/4) e cinza (2,5 Y 6/2) dura e de fratura angulosa.	-	-
Sedimentos arenosos/Huelva	Solo pardo arenoso/Solos jovens, desenvolvidos sobre areias. Sobre as dunas costeiras e áreas arenosas de escassa vegetação, perfil geralmente profundo e uniforme em todas suas características (regosolo). Em áreas diversas, onde o substrato impede a drenagem, se encontram solos com sinais de hidromorfismo. São solos pardos arenos com pseudogley, estando em nível freático,	0 – 40	Cor: pardo amarelado (10YR 5/4), arenoso, grãos individuais que tendem a formar grumos muito finos e pouco estáveis, solo poroso permeável, não calcárico, matéria orgânica escassa, atividade biológica, poucas raízes, limite claro e regular.	40-100	Cor: pardo amarelado muito claro (10YR 8/4), arenoso com grãos individuais soltos, poroso, permeável, não calcárico, limite claro e descontínuo.	60-100	D1-Cor: pardo muito claro (10 YR 8/4), arenoso com grãos individuais soltos, poroso, permeável, não calcárico, limite claro e descontínuo.	D1: 100-120 D2: 200	D1-Cor: vermelho amarela da muito claro (7,5 YR 7/8), arenoso com grãos individuais com tendência a a estrutura subpoliédrica muito pouco estável, muito friável, muito poroso, permeável, não calcárico. D2- Branco amarelado (2,5

muitas vezes,
a menos de
1m de
profundidade.

YR 8/2).

Sedimentos Eluviais/Córdoba	Calcário com sedimentos aluvionares/Solo das margens dos rios, constituído de sedimentos jovens pouco transformados. Perfil geralmente profundo.	A ₁₁ : 0 - 10 A ₁₂ : 10 - 45	Cor: pardo cinza escuro (10YR 4/2), limoarenoso, estrutura grumosa média, moderadamente desenvolvido, muito friável, permeável, calcário, medianamente orgânico, raízes finas, boa atividade biológica, limite diferenciado e regular/Cor: pardo escuro (10YR 4/3), limoarenoso, estrutura de grãos individuais e de grumos pouco estáveis, muito friável, poroso, permeável, calcário, ligeiramente orgânico, raízes finas isoladas, boa atividade	-	-	45-65	Pardo (10YR 5/3), limoarenoso, estrutura de grãos individuais, muito friável, poroso, permeável, calcário, algumas raízes grossas na parte superior do horizonte, limite diferenciado e regular.
-----------------------------	--	---	---	---	---	-------	--

biológica,
limite
gradual e
regular.

Calcário/Sevilha	<p>Solos muito calcários de coloração cinza escuro, cinza a cinza escuro, formado sobre calcários, areias calcárias e calcários margosos e se encontram mesclados com o horizonte C, dando solos muito claros que em zonas altas erodidas são solos de calcário bruto. Em áreas elevadas se encontram solos cinza claro sobre calcário duro que aflora até a superfície, pouco profundos. Sobre os calcários margosos se forma um solo de cor cinza mais ou menos escuro,</p>	<p>A_p: 0-25 A/C: 25-125</p>	<p>A_p: Cinza claro (5YR 7/1), argiloso, estrutura grumosa grossa fortemente desenvolvida, friável, poroso, permeável, muito calcário, raízes finas e algumas grossas, moderadamente orgânico, boa atividade biológica, limite claro e regular. A/C: argiloso, estrutura de grossos blocos poliédricos fortemente desenvolvidos, firme, algo compacto, permeável, muito calcário, raízes</p>	150	<p>Branco (5Y 8/1). Argiloso, estrutura grumosa média, moderadamente desenvolvida, friável, algo poroso, medianamente permeável, muito calcário.</p>
------------------	---	--	--	-----	--

de textura mais pesada que os anteriores, de estrutura grumosa, pouco orgânico e de uns 20 cm de espessura, abaixo ao qual já aparece o material original alterado (marga) enriquecido em concreções calcárias. São solos representativos das províncias de Huelva, Cádiz e Córdoba.

grossas, escassa atividade biológica, limite gradual e ondulado.

Calcário e Marga/Córdoba	Terra parda calcárea sobre calcários/Solos calcimórficos desenvolvidos principalmente e sobre calcáreos dependente da posição da paisagem, por esse motivo são de fácil erosão, relativamente pouco profundos e frequentemente pedregosos. Se encontram principalmente em áreas próximas a litosolos jurássicos das Serras Subbéticas, cuja erosão se deve, em parte, a pedregosidad e.	A ₁₁ : 0 - 5 A ₁₂ : 5 - 20	A ₁₁ : Pardo escuro (10YR 4/3), argiloso, estrutura grumosa média bem desenvolvida, friável, algo poroso, permeável, calcárico, moderadamente orgânico, abundantes raízes finas, fragmentos pequenos de calcário abundante e meidanos em superfície, boa atividade biológica, limite gradual e regular. A ₁₂ : Pardo (10YR 5/3), argiloso, estrutura grumogranular, fina fortemente desenvolvida, friável,	20-40	Amerelo oliva a pardo oliva claro (2,5 YR 6/6, 5/6), limoargiloso, estrutura poliédrica subangular média moderadamente desenvolvida, firme, algo compacto, permeável, calcário, com fragmentos calcáreos, permeável, calcáreo, limite claro e regular.	B/CA/C (40-70) - C (70)	Características idênticas ao anterior, mas abundante calcário branco e fragmentos de calcário alterada - rocha branca amarelada de calcário, com blocos fraturados mais ou menos tabulares.
--------------------------	---	---	---	-------	--	-------------------------	---

algo poroso, permeável, calcárico, moderadamente orgânico, menos raízes, fragmentos pequenos de calcário abundante, boa atividade biológica, limite claro a regular.

Marga pedregosa/C órdoba	<p>Terra negra Andaluza/Solos desenvolvidos sobre materiais ricos em argilas do tipo montmorilonítica (margas e calcáreos margosos) em áreas de topografia plana e depressões com clima seco-subúmido. Estas e outras condições determinam o caráter vertisolos das terras pretas andaluzas. As terras pretas andaluzas são solos profundos, de cor cinza parda muito escura, de textura</p>	A ₁ : 0 - 15	<p>Cor cinza (10YR 5/1) argiloso, estrutura subpoliédrica a poliédrica, média, fortemente desenvolvida, muito firme, compacto, pouco permeável, calcáreo, com concreções calcáreas pequenas, ligeiramente orgânico, escassa atividade biológica, raízes finas e medianas, gretas profundas, limite difuso.</p>	A ₁ /B (15-55)	<p>Cor cinza pardo (10 YR 4/1), argiloso, estrutura poliédrica, média, moderadamente desenvolvido, firme, compacto, pouco permeável, calcáreo, com algumas concreções calcárias pequenas, ligeiramente orgânico, limite difuso, algumas cascalhos médios e pequenas.</p>	C _a /C (55)	<p>Cor cinza parda (2,5 YR 5/2), argiloso arenoso, estrutura subpoliédrica-grumosa, pouco desenvolvida, algo firme, compacto, moderadamente permeável, calcáreo, com abundantes concreções cascalhos frequentes.</p>
--------------------------	--	-------------------------	--	---------------------------	--	------------------------	--

pesada e estrutura grumosa em superfície e poliédrica ou prismática, fortemente desenvolvida, em profundidade. É de reação moderadamente alcalina, aumentando a proporção de carbonatos ligeiramente em horizontes profundos, pouco permeável e mal drenado. Devido a natureza e proporção da argila retém muita água. Em muitos casos apresenta sinais de gleização e quase sempre em subsolo existem condições redutoras mais ou menos intensas. Se encontra principalmente entre as províncias de Cádiz, em Córdoba está menos representado e no resto da zona apenas existe.

Marga/Córdoba	Solo margoso bético/São solos de cor parda amarelada ou cinza pardo oliva, de textura pesada. Estão desenvolvidos sobre margas do Mioceno e Eoceno. Os casos de maior desenvolvimento tem estrutura prismática nos	A _p : 0-40	Pardo oliva claro (2,5 Y 5/6), limoargilos o, estrutura poliédrica subangular, grossa moderadamente desenvolvida, algo firme, compacto, medianamente permeável, calcáreo, ligeiramente	40-80	Pardo amarelado claro (2,5 YR 6/4), limoargiloso, estrutura prismática-colunar, fortemente desenvolvido, muito firme, poroso fino, pouco permeável, calcáreo, raízes médias e grossas, concreções de calcários isoladas,	80-120	Pardo olivo claro (2,5 YR 5/6) limoargiloso, estrutura poliédrica grossa, fortemente desenvolvido firme, compacto, pouco permeável, calcáreo.
---------------	--	-----------------------	--	-------	--	--------	---

	<p>horizontes intermediários e poliédricos no material original. São de muita escassa permeabilidade e extraordinariamente plástico e densos em estado úmido. Com frequência apresentam horizontes profundos pseudogleizados e sempre com caráter vértico mais ou menos manifestado. Apresentam escasso conteúdo de matéria orgânica, pH alcalino, alta saturação em cálcio e de moderado conteúdo de carbonato de cálcio livre que aumenta ligeiramente em profundidade.</p>	<p>e orgânico, raízes finas e medianas, boa atividade biológica, limite claro e regular.</p>	<p>limite difuso e regular.</p>			
Pizzara/Sevilha	<p>Terra parda meridional sobre pizarras/Geralmente poucos profundos por causa da topografia acidentada do terreno, de cor pardo ou pardo escuro, textura média e estrutura grumosa na superfície, o horizonte B é de cor pardo claro ou avermelhado, de textura as vezes mais argilosa e estrutura poliédrica. O horizonte C parece quase sempre não mais de 40 cm de</p>	<p>A₀₀ + A₀: Pardo muito escuro (10 YR 2/2), abundantes raízes e folhas em decomposição. A₁: Pardo amarelado escuro (10YR 4/4), limoarenoso, estrutura grumosa, moderadamente desenvolvida, friável, poroso, permeável, não calcárico, moderadamente orgânico, raízes finas</p>	40-60	<p>Pardo claro (10YR 6/3), limoargiloso, estrutura grumopoliédrica subangular média, moderadamente desenvolvida, friável, permeável, não calcárico, com inclusões de pizarra alterada, limite gradual a ondulado.</p>	60	<p>Pizarra alterada, com manchas escuras de óxidos, facilmente fracionável.</p>

profundidade. O pH é ligeiramente ácido, o conteúdo de matéria orgânica é baixo a moderado e a saturação de cálcio baixa e CTC entre 10 e 15 meq/100g. É o solo climax em Serra Morena.

e médias, boa atividade biológica, limite claro e ondulado.

Granito/Córdo	<p>Terra parda meridional/Solos geralmente mais profundos que os anteriores, de cor mais clara e que mostram um potente horizonte B/C com progressivo grau de alteração. Ocupa áreas pouco acidentadas incluindo as áreas planas. Se encontram menos comuns sobre granitos ácidos.</p>	<p>A₁₁ (0-20) / A₁₂(10-20)</p>	<p>A₁₁: Pardo amarelado escuro (10YR 3/4), arenolimoso, estrutura grumosa fina, moderadamente desenvolvida, muito friável, solo em estado seco, poroso, permeável, não calcário, ligeiramente e orgânico, raízes médias frequentes, boa atividade biológica, limite difuso e regular. A₁₂: Pardo amarelado escuro (10YR 4/4), limoarenoso, estrutura grumoparticular, solo muito friável, poroso, permeável, não calcário,</p>	20-40	<p>Pardo forte (10YR 4/4), limoarenoso, estrutura grumoparticular, solta, muito friável, poroso, permeável, não calcário, poucas raízes, limite claro e ondulado.</p>	B/C (40-100)	<p>Rocha granítica alterada, cor heterogênia branca, vermelha e pardo escuro, rica em mica, com fratura de poliedros médios poucos consistentes, textura limoarenosa, com predomínio de areia grossa.</p>
---------------	--	--	--	-------	---	--------------	---

poucas
raízes,
limite claro
e
ondulado.

Arenito/Sevilha	Terra parda meridional/Solo de cor vermelho escuro ou pardo avermelhado escuro devido o material original (Arenito Vermelhado). Estes solos ocupam áreas descontínuas na borda de Serra Morena, em contato com os terrenos da margem direita do rio Guadalquivir. As áreas mais importantes se encontram na bacia do rio Viar (Sevilha) e entre as províncias de Córdoba e Jaén.	A ₁ : 0 - 10	Pardo avermelhado (2,5 YR 4/4), limoso, estrutura grumosa média, bem desenvolvida, friável, poroso, permeável, não calcárico, moderadamente orgânico, raízes finas e médias abundantes, boa atividade biológica, pequenos fragmentos de pizarras e cascalho fino escuro, limite claro e regular.	10-40	Vermelho débil (2,5 YR 4/2), limoso, estrutura grumosa média, bem desenvolvida, friável, poroso, permeável, não calcárico, moderadamente orgânico, raízes finas e médias abundantes, boa atividade biológica, pequenas partes de pizarra e cascalho fino escuro, limite claro e irregular.	R1/R2 (rocha) (80)	Pizarra alterada com arenitos cinzento com conglomerados com seixos de arenito de grande tamanho.
-----------------	--	-------------------------	--	-------	--	--------------------	---

Arenito/Cádiz	<p>Terra pardasolo vermelho sobre arenito/Solos de cor parda escura ou pardo avermelhado, arenosos, neutros ou ligeiramente ácidos, formados sobre arenitos silicatadas. Estes solos se encontram no sudeste de Cádiz (região de serras e colinas do Campo de Gibraltar). A morfologia e disposição do perfil é variável, posto que a região em que se encontram estes solos apresenta condições topográficas e climáticas locais e muito distintas. Assim por exemplo, a erosão nessas áreas mais acidentadas favorece o surgimento dos litosolos, que posteriormente se evolui, em outras situações se enquadram em perfis com horizontes de pseudogley e solos com maior grau de evolução.</p>	0-10	<p>Pardo avermelhado (5YR 5/4), limoarenoso, estrutura grumosa fina, pouco desenvolvido e pouco estável, não calcáreo, moderadamente orgânico, raízes finas e médias, boa atividade biológica, limite claro e regular.</p>	10-20	<p>Vermelho (2,5 YR 5/6), limo-argiloso-arenoso, estrutura granular grossa a poliédrica fina fortemente desenvolvida, firme, algo compacto, permeável, não calcáreo, limite claro e regular.</p>	B/C (20-100)	<p>Fragmentos de arenitos alterados, de cor branca amarelada e ocre cimentados por solos dos horizontes superiores.</p>
---------------	---	------	--	-------	--	--------------	---

Calcário/Huelva	<p>Terra parda ferrítica/Solos de cor avermelhada muito escura, geralmente profundos, limosos, solos grumosos e moderadamente orgânico no horizonte A. O horizonte B de cor pardo avermelhado, de igual textura do anterior e estrutura subpoliédrica com profundidades variáveis, incluso aflorando na superfície, se encontra a rocha origem, constituída por grandes blocos de calcário cinza, muito dura. O solo está fortemente enriquecido em hidróxidos e óxidos de ferro e manganês, tem reação praticamente neutra e escasso conteúdo de sílica. CTC é de 20 meq/100g no horizonte orgânico, mas apresenta valores decrescente no perfil entre 5 e 8 no resto do mesmo. A saturação aumenta com a profundidade até chegar a 100. Não existe carbonato de cálcio livre.</p>	<p>A₀ + A₁ (0-30) A₁ (30-60) A/B (60-90)</p>	<p>(A₀ + A₁) (A₁): vermelho muito escuro (10R 2/2), limoso, estrutura grumosa média moderadamente desenvolvida, friável, muito poroso, permeável, não calcárico, moderadamente orgânico, raízes medianas, boa atividade biológica, limite difuso e liso. Algumas pedras. A/B: pardo vermelho escuro (2,5 YR 2/4), limoso, estrutura grumosa e poliédrica subangular média, moderadamente desenvolvida, friável, muito porosa, permeável, não calcárica, raízes de diversos tamanhos, boa atividade biológica, limite difuso e liso.</p>	<p>B₁(90-120) B₂(120-150)</p>	<p>B₁=AB. B₂=B₁</p>	<p>C(150)</p>	<p>Grandes blocos de calcário duro cinza a diversas profundidades.</p>
-----------------	---	---	--	---	--	---------------	--

Pizzara/Córdoba	Solo vermelho mediterrâneo sobre pizarra/O horizonte A é de cor pardo, em algumas ocasiões pardo escuro, mas muitas vezes pela erosão, possui textura média e estrutura grumosa bem desenvolvida. O horizonte B é de cor vermelho intenso, limoargiloso, poliédrico e compacto. O horizonte C, de pizarra e esquiósios de quartzito se passa por uma transição de cor avermelhada a cinzenta, os horizontes B e C passam por abundantes inclusões de material original muito alterado.	A ₁ (0-15)	Pardo avermelhado (5YR 4/4), limoso, estrutura grumosa grossa fortemente desenvolvida, friável, algo poroso, permeável, não calcárico, muito ligeiramente e orgânico, raízes medianas frequentes, boa atividade biológica, limite gradual e algo ondulado.	B (15-40)	Vermelho (10Y 4/6), argiloso, estrutura poliédrica média fortemente desenvolvida, algo brando, compacto, pouco permeável, não calcárico, limite claro e regular.	B/C ₁ (40-60) C ₁ (60-100)	B/C ₁ : cor variegado, manchas vermelhas e branco acinzentadas, argiloso, algo firme, estrutura laminar grossa bem desenvolvida, compacto, pouco permeável, não calcárico, limite difuso e irregular. C ₁ (60-100). Cor mais variegado, branco acinzentado com manchas vermelhas e ocres isoladas, argilolimoso, estrutura laminar grossa pouco estável, brando, compacto, pouco permeável, não calcárico.
-----------------	--	-----------------------	--	-----------	--	---	--

Sedimentos quaternários antigos/Córdoba	Solo vermelho mediterrâneo /Solo de cor vermelha mais ou menos intensa, desenvolvidos sobre calcários, geralmente do tipo arenitos. Também se encontram sobre sedimentos calcários e pedregosos. O horizonte A, quando não está alterado é pouco profundo de cor parda ou pardo avermelhado, moderadamente orgânico, de textura dependente do material original e estrutura geralmente grumosa fina. Em alguns casos se pode observar a presença do horizonte A2 mais ou menos desenvolvidos. Segue geralmente, um horizonte B textural, de máximo desenvolvimento estrutural, de cor vermelho intenso, de textura média ou pesada, com predomínio de materiais finos e rico em sesquióxidos, as vezes pode observar a presença de um subhorizonte B. Se encontra outro horizonte vermelho em	A _p (0-15)	Pardo avermelhado escuro (5YR 3/3), limoargiloarenoso, estrutura grumosa média, moderadamente desenvolvida, friável, poroso, permeável, moderadamente calcárico, moderadamente orgânico, boa atividade biológica, algumas raízes finas, limite claro e regular.	B (15-50) B/C _a (50-85)	B: Vermelho escuro (2,5YR 3/6), argiloso, estrutura poliédrica-prismática grossa fortemente desenvolvida, firme, compacto, medianamente ou pouco permeável, ligeiramente calcárico, escassa atividade biológica, limite claro e regular. B/C _a cor amarelo avermelhado, argiloso, estrutura poliédrica-subangular grossa moderadamente desenvolvida, algo firme, compacto, medianamente permeável, calcárico, com concreções de calcário, limite claro.	85	Abundantes concreções de calcário.
---	---	-----------------------	---	---------------------------------------	--	----	------------------------------------

continuação
do anterior de
cor vermelho
menos
intenso, de
textura mais
ligeira e
estrutura
menos
desenvolvida.

Deste
horizonte se
passa a rocha
original
através de um
horizonte
enriquecido
em nódulos
calcáricos.

Também, em
condições de
microrelevo e
condições
adequadas
também se
pode observar
um horizonte

B
pseudoglético.
São solos de
pH neutro a
ligeiramente
alcalino com o
complexo
adsorbente
saturado em
cálcio e
escassa
proporção de
matéria
orgânica.

Sedimentos quaternários/Sevilha	<p>Solo pardo lavado com pseudogley/Sobre as terras quaternárias antigas do rio Guadalquivir estão desenvolvidos uma série de solos com processos lavado e hidromorfismo mais ou menos acentuados. O horizonte A de uns 20 cm de espessura, é de cor parda a parda amarelada escuro e pardo claro no seco, de textura arenosa e estrutura particular solta, com cascalho fino e alguns nódulos ferruginosos. O horizonte textural B é de textura argiloarenosa, estrutura poliédrica-prismática fortemente desenvolvida, compacta e muito firme, pode conter cascalhos finos e nódulos ou manchas ferruginosas, insuficiência de carbonato livre, é plástico em estado úmido e de pouca permeabilidade. Este solo pode alcançar mais de 1 m de profundidade. Na continuação do perfil aparece uma zona de enriquecimento</p>	0-20	<p>Pardo amarelado escuro (10YR 4/4), limoarenoso, estrutura de grãos soltos, muito friável, solo poroso, permeável, não calcárico, ligeiramente orgânico, escassas raízes, concreções ferruginosas pequenas, limite claro e regular.</p>	<p>Bg₁ (20-45) Bg₂₁ (45-70) Bg₂₂ (70-120)</p>	<p>Bg1: cor parda forte (7,5YR 5/6), argiloarenoso, estrutura em blocos subangulares moderadamente desenvolvida, friável, poroso, permeável, não calcárico, ligeiramente orgânico, escassas raízes médias e grossas, ligeira atividade biológica, abundantes concreções ferruginosas, limite claro e regular, ligeiramente plástico. Bg21: Igual cor, limo-argiloarenoso, estrutura poliédrica grossa, moderadamente desenvolvida, firme, algo poroso, pouco permeável, não calcárico, abundantes concreções ferruginosas, limite gradual e regular. Bg22: Cor variegada, parda amarelada escuro</p>	Bg ₂₂ /Ca (120-145)	<p>Igual cor variegado dos horizontes anteriores, argiloarenoso, estrutura poliédrica subangular, média, moderadamente desenvolvida, friável a firme, algo poroso, pouco permeável, calcárico, abundantes concreções calcáricas, limite abrupto e regular.</p>	145-200	<p>Pardo avermelhado (5YR 4/4), limoarenoso, estrutura poliédrica subangular, firme, compacto, pouco permeável, calcárico, pequenas concreções e nódulos calcáricos.</p>
---------------------------------	--	------	---	--	--	--------------------------------	--	---------	--

to em
carbonato de
cálcio debaixo
dos quais
aparecem
mantos de
cascalho,
margas,
arenitos ou
sedimentos
vermelhos de
um terraço
mais antigo.

Existem
variedades
pedregosas
desdes solos e
outras com
hidroformism
o mais
acentuado.

Existem
variedades
pedregosas
destes solos e
outros com
hidromorfism
o mais
acentuado.

Existem
outras regiões
tais como em
Cádiz, Huelva,
Sierra
Morena, e
norte da
província de
Córdoba que
foram
estudados
esses tipos de
solos.

Sedimentos aluviais/Cádiz	Solo salino/Solos enriquecidos em sais solúveis, formados sobre sedimentos aluviais fluviais que sofreram influência de águas salinas. O perfil destes solos, geralmente do tipo AG está pouco diferenciado, dominando, ademais as propriedades de salinidade, um acentuado hidromorfismo com forte redução no subsolo que origina horizontes de gley. CTC elevado de acordo com seu conteúdo de argila e sua natureza.	0-50	Cor cinza escuro (5Y 4/1), limoargiloso, estrutura poliédrica subangular, aglomerado friável, medianamente permeável, calcárico, moderadamente orgânico, escassas raízes, limite difuso.	G ₁ : 50-65 G ₂ : 65-210	G ₁ : Igual cor do horizonte anterior, porém mais claro, argilolimoso, estrutura poliédrica prismática, moderadamente desenvolvida, firme, compacta, muito pouco permeável, calcárica, limite gradual e regular. G ₂ : igual cor, com algumas manchas avermelhadas ou cinza escuro pardo, argilolimoso, estrutura em blocos prismáticos, muito firme, compacto, muito pouco permeável, calcárico e úmido.
---------------------------	---	------	--	---	---

Fonte: GUERRERO e GOMÉZ, 1966; RODRIGUEZ e MARTINEZ, 1966; RODRIGUEZ, 1989; MEGIA e MUÑOZ, 2006.