

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

Gabriela Meira Teixeira

**AVALIAÇÃO E ESTIMATIVA DE RECARGA DOS AQUÍFEROS DA REGIÃO DA  
APA CARSTE DE LAGOA SANTA, MG**

Belo Horizonte  
2023

Gabriela Meira Teixeira

**AVALIAÇÃO E ESTIMATIVA DE RECARGA DOS AQUÍFEROS DA REGIÃO DA  
APA CARSTE DE LAGOA SANTA, MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula.

Coorientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leila Nunes Menegasse Velásquez

Belo Horizonte  
2023

T266a  
2023

Teixeira, Gabriela Meira.

Avaliação e estimativa de recarga dos aquíferos da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG [manuscrito] / Gabriela Meira Teixeira. – 2023. 130 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Rodrigo Sérgio de Paula.

Coorientadora: Leila Nunes Menegasse Velásquez.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

Área de concentração: Geologia Econômica Aplicada.

Bibliografia: f. 123-130.

1. Aquíferos – Lagoa Santa (MG) – Teses. 2. Carste – Lagoa Santa (MG) – Teses. 3. Hidrogeologia – Teses. I. Paula, Rodrigo Sérgio de. II. Velásquez, Leila Nunes Menegasse. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 556.3(815.1)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC-UFMG**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**AVALIAÇÃO E ESTIMATIVA DE RECARGA DOS AQUÍFEROS DA REGIÃO DA APA  
CARSTE DE LAGOA SANTA, MG.**

### **GABRIELA MEIRA TEIXEIRA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre(a) em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

Aprovada em 25 de agosto de 2023, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Dr. Rodrigo Sérgio de Paula – Orientador  
UFMG

Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão  
UFMG

Dr. Lucas Padoan de Sá Godinho  
UFMG

Profa. Dra. Luana Alves de Lima  
UFVJM

Belo Horizonte, 25 de agosto de 2023.

*À minha mãe.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me conduzido nesta jornada.

Agradeço à minha mãe Lourdes, meu pai Antônio, meu irmão Dudu e minha cunhada Daiane pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência. A meus pais por incentivarem minha educação e apostarem nela como o caminho para uma vida melhor. Agradeço principalmente à minha mãe por ter sido a muralha que manteve a força e guiou seus filhos para o caminho correto mesmo nos dias mais sombrios. Serei eternamente grata a você.

Agradeço ao meu orientador Rodrigo de Paula, que, desde a iniciação científica tem difundido e repassado, com muita paciência e entusiasmo, conhecimentos científicos e profissionais preciosos. Agradeço à minha coorientadora Leila Velásquez por ter me dado a oportunidade, inicialmente, de ser sua monitora e depois bolsista de iniciação científica, quando minha jornada neste projeto começou, e que foi porta de entrada para tantas outras oportunidades cruciais para meu crescimento. Vocês dois mudaram positivamente a vida de muitos alunos, e serão sempre lembrados com muito carinho.

Agradeço a todos os amigos que fiz neste projeto de pesquisa, pelos conhecimentos repassados, pelos trabalhos de campo realizados em conjunto e todas as experiências compartilhadas.

Aos meus amigos de faculdade, especialmente Matheus Lacerda e Ana Luiza Carvalho pelo companheirismo de sempre.

Agradeço à CSN pelo suporte e liberações necessárias para que eu conseguisse finalizar esta dissertação. E aos meus colegas de trabalho pela compreensão e apoio.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade/Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - ICMBio/CECAV, pelo financiamento do Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais.

Ao Instituto de Geociências – UFMG pela oportunidade e infraestrutura disponibilizadas para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos membros da banca, Paulo Galvão e Lucas Godinho pelas valiosas contribuições.

## RESUMO

A Área de Proteção Ambiental (APA) Cárstica de Lagoa Santa é um lugar de grande relevância ambiental e científica, onde estão armazenados aquíferos essenciais formados por rochas carbonáticas da bacia do Bambuí, que desempenham um papel fundamental no fornecimento de água para a população da região. Esta área está localizada no Estado de Minas Gerais, Brasil, e, apesar de sua significativa relevância ambiental, enfrenta desafios relacionados ao aumento dos impactos ambientais causados pela atividade humana. Portanto, é fundamental conduzir estudos que analisem a interação entre as águas superficiais e subterrâneas nesta região. Este trabalho propôs, neste sentido, realizar a estimativa de recarga aquífera na região utilizando-se quatro diferentes métodos: o de deslocamento da curva de recessão de Rorabaugh (1964), o método de filtro digital recursivo desenvolvido por Lyne e Hollick (1979) e automatizado por Smakhtin (2001), o método baseado na variação do nível d'água em poços de observação, de Healy e Cook (2002), e um quarto método baseado na aquisição indireta do índice de recarga por meio da sobreposição de mapas de categorização dos parâmetros que influenciam na recarga, chamado APLIS, de Andreo *et al.*, (2004), em que realizou-se sua adaptação para aplicação no carste estudado. A aplicação de mais de um método objetivou a comparação dos resultados e definição das vantagens e as fragilidades de cada um, aplicado às condições específicas da área estudada. Foi realizada ainda o tratamento de validação dos dados de monitoramento e das curvas chave dos principais córregos da área, e realizada uma caracterização das bacias hidrográficas e do seu comportamento frente aos eventos pluviométricos. Além da análise quantitativa, este trabalho realizou a caracterização e setorização das principais zonas de recarga nos maciços rochosos, nas depressões cársticas, nas áreas de cobertura de solo, além de setorizar a recarga por litotipo. Os índices médios de recarga anual obtidos pelos métodos de deslocamento da curva de recessão, de filtro digital recursivo, da variação do nível d'água e do APLIS adaptado foram, respectivamente, 13%, 9%, 9% e 16%. As elevadas taxas de bombeamento na região sugerem valores subestimados de recarga utilizando os dados de monitoramento direto. Entre os métodos de recarga que utilizam dados de descarga das bacias, o de Rorabaugh (1964) apresentou maior acurácia por utilizar medições diárias de vazão. Porém, o método de Lyne e Hollick (1979) automatizado por Smakhtin (2001), mesmo utilizando uma base de dados mensais de vazão, revelou ser aplicável para períodos de monitoramento mais longos. O método de variação do nível d'água e o APLIS foram úteis para a melhor setorização dos índices de recarga. Este trabalho foi relevante por propor a estimativa de recarga utilizando diferentes metodologias e base de dados, a fim de permitir a replicação

destas técnicas, inclusive em regiões onde não há monitoramento físico, sendo, portanto, úteis para adoção por órgãos públicos ou mesmo privados, e em locais remotos ou onde não há investimentos ou projetos para implantação de redes de monitoramento.

Palavras-Chave: recarga aquífera; APA Carste de Lagoa Santa; deslocamento da curva de recessão; filtro digital recursivo; variação do nível d'água; APLIS.



## ABSTRACT

The Karst Environmental Protection Area (EPA) of Lagoa Santa is a place of great environmental and scientific significance, where essential aquifers formed by carbonate rocks from the Bambuí basin are stored, playing a fundamental role in supplying water to the region's population, both public and private. This area is located in the state of Minas Gerais, Brazil, and despite its significant environmental relevance, it faces challenges related to the increasing environmental impacts caused by human activity. Therefore, it is crucial to conduct studies that analyze the interaction between surface and groundwater in this region. In this regard, this work aimed to estimate aquifer recharge in the region using four different methods: the recession curve displacement method by Rorabaugh (1964), the digital recursive filter method developed by Lyne and Hollick (1979) and automated by Smakhtin (2001), the method based on water level variation in observation wells by Healy and Cook (2002), and a fourth method based on indirect acquisition of recharge indices through the overlay of parameter categorization maps influencing recharge, called APLIS by Andreo *et al.*, (2004), which was adapted for application in the studied karst. The application of more than one method aimed to compare the results and define the advantages and weaknesses of each one when applied to the specific conditions of the study area. Validation of monitoring data and key streamflow curves for the main streams in the area was also carried out, along with a characterization of the hydrographic basins and their behavior in response to rainfall events. In addition to quantitative analysis, this work characterized and zoned the main recharge areas in rock masses, karst depressions, soil cover areas, and by lithotype. The average annual recharge rates obtained by the recession curve displacement, digital recursive filter, water level variation, and adapted APLIS methods were, respectively, 13%, 9%, 9%, and 16%. The high pumping rates in the region suggest underestimated recharge values using direct monitoring data. Among the recharge methods using basin discharge data, the Rorabaugh (1964) method showed higher accuracy because it uses daily flow measurements. However, the Lyne and Hollick (1979) method automated by Smakhtin (2001), even using a monthly flow database, proved to be applicable for longer monitoring periods. The water level variation method and APLIS were useful for better zoning of recharge indices. This work was relevant for proposing recharge estimation using different methodologies and databases, allowing the replication of these techniques, even in regions where there is no physical monitoring. Therefore, these methods are useful for adoption by public or private organizations, especially in remote areas or where there are no investments or projects for monitoring network implementation.

Keywords: aquifer recharge; Lagoa Santa Karst APA; recession curve displacement; recursive digital filter; water level variation; APLIS.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Mapa de Localização da área de estudo com destaque para região da APA Carste de Lagoa Santa, a área de estudo, a hidrografia da região e as rodovias de acesso. ....  | 23 |
| Figura 2.2 – Mapa de Thiessen da área de estudo considerando as estações de Sete Lagoas, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Vespasiano. Foram indicadas também as bacias hidrográficas, a rede de drenagem e as estações de monitoramento pluviométrico e fluviométrico, além de fotos do local de medição de vazão dos córregos..... | 25 |
| Figura 2.3 – Mapa geológico da região de estudo. Retirado de Ribeiro <i>et al.</i> (2003) e modificado por trabalhos de Vieira (2015) e Ribeiro <i>et al.</i> (2016) com destaque para região da APA Carste. ....  | 27 |
| Figura 2.4 – Exemplo de estação fluviométrica instalada nos córregos Samambaia (foto a esquerda) e Jaguará (foto a direita), com indicação das réguas instaladas e dos equipamentos instalados para armazenar o transdutor de pressão.....   | 30 |
| Figura 2.5 – Curvas chaves atualizadas das vazões monitoradas entre o período de 2016 a 2021 dos córregos Flor, Palmeira, Samambaia, Jaque, Gordura e Jaguará.....   | 33 |
| Figura 2.6 – Hidrogramas de vazão de monitoramento dos anos hidrológicos de 2017 a 2021 dos córregos Flor, Palmeira, Samambaia, Jaque, Gordura e Jaguará.....  | 36 |
| Figura 2.7 – <i>Boxplot</i> das vazões monitoradas com aproximação fora de escala para cada córrego.....   | 40 |
| Figura 3.1 - Mapa de Localização da área de estudo com destaque para região da APA Carste de Lagoa Santa e da área de estudo. Há ainda indicação dos municípios dentro e nos arredores da área de estudo, e destaque para os principais cursos d'água da região.....   | 50 |
| Figura 3.2 – Mapa de Thiessen da área de estudo considerando as estações pluviométricas de Sete Lagoas, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Vespasiano. Foram indicados também os pontos de monitoramento fluviométricos e os poços tubulares monitorados. ....  | 52 |
| Figura 3.3 – Mapa geológico da região de estudo. Retirado de Ribeiro <i>et al.</i> (2003) e adaptado por trabalhos de Vieira (2015) e Ribeiro <i>et al.</i> (2016). ....   | 53 |
| Figura 3.4 – Esquema ilustrativo da utilização do método de deslocamento das curvas de recessão para se estimar a recarga. Adaptado de Chen e Lee (2003). ....   | 58 |
| Figura 3.5 – Aumento hipotético do nível d'água em resposta à chuva. $\Delta h$ representa a diferença entre o pico do aumento do nível e o ponto mais baixo da curva de recessão que antecede o evento de chuva (adaptado de Healy e Cook, 2002). ....  | 63 |
| Figura 3.6 - Distribuição pluviométrica dos anos hidrológicos monitorados. ....  | 65 |
| Figura 3.7 –Distribuição do balanço climatológico para anos hidrogeológicos estudados a partir da utilização do método de Thornthwaite e Mather (1955) com utilização da planilha eletrônica de Rolim <i>et al.</i> (1998).....  | 67 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.8 – Hidrógrafas das vazões diárias com a separação de escoamento superficial e de base das bacias hidrogeológicas monitoradas e os eventos pluviométricos ocorridos em cada bacia.....  | 69  |
| Figura 3.9 – Valores mensais de recarga para as bacias hidrogeológicas monitoradas e variações pluviométricas da Estação Lagoa Santa. ....   | 72  |
| Figura 3.10 - Hidrógrafas das vazões mensais com separação dos escoamentos superficial e subterrâneo das bacias hidrogeológicas monitoradas, concomitantes aos eventos pluviométricos ocorridos em cada bacia. Método utilizado para a separação do escoamento foi Lyne e Hollick (1979) e adaptado por Smakhtin (2001). ....  | 74  |
| Figura 3.11 – Exemplo de aplicação do método VNA em eventos específicos de chuva que acarretou na variação do nível d’água do poço 00681-2004 durante o período chuvoso do ano hidrológico de 2018/2019. As retas tracejadas de vermelho são o prolongamento das curvas de recessão, e foram utilizadas para definir a variação entre o maior e menor nível d’água registrado antes e depois dos eventos de chuva..... | 77  |
| Figura 3.12 –Mapas analisados conjuntamente visando correlacionar as zonas de maior e menor índice de recarga com as características de cada litotipo: A) Valores médios de recarga e B) Mapa geológico da área.....   | 79  |
| Figura 4.1 – Localização da área de estudo, com indicação do estado de Minas Gerais e de sua capital, e detalhe para os municípios, hidrografia e rodovias de acesso, além da área de estudo e da APA Carste de Lagoa Santa.....   | 93  |
| Figura 4.2 – Mapa de Thiessen com indicação das estações de monitoramento pluviométrico de abrangência na área (Sete Lagoas, Vespasiano, Lagoa Santa e Pedro Leopoldo). Há indicação ainda das estações de monitoramento fluviais.....   | 95  |
| Figura 4.3 – Mapa com indicação dos compartimentos geomorfológicos, da variação de altitude e dos sumidouros, cavidades, maciços e das depressões mapeadas na área.....  | 97  |
| Figura 4.4 – Mapa de solos da área de estudo, a partir do mapeamento em escala 1:5000 de Viana <i>et al.</i> (1998) e do mapeamento em escala 1:650.000 elaborado pela UFV (2010). ....  | 98  |
| Figura 4.5 – Mapa geológico da região de estudo. Retirado de Ribeiro <i>et al.</i> (2003) e adaptado por trabalhos de Vieira (2015) e Ribeiro <i>et al.</i> (2016). ....   | 100 |
| Figura 4.6 – Tabelas do método APLIS original, com as pontuações atribuídas das categorias Altitude, Declividade, Litologia, Infiltração preferencial e Solo. ....   | 102 |
| Figura 4.7 – Esquema explicativo da sobreposição das camadas para aplicação do método APLIS, com exemplo da aplicação na Sierra de las Nieves, Espanha. Adaptado de Andréo <i>et al.</i> (2008). ....  | 104 |
| Figura 4.8 – Tabelas do método APLIS adaptado às características do carste da área de estudo, com as pontuações atribuídas das categorias Altitude, Declividade, Litologia, Infiltração preferencial e Solo. ....  | 105 |
| Figura 4.9 – Mapas resultantes da classificação dos parâmetros Altitude e Inclinação.....  | 107 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4.10 – Mapas resultantes da classificação dos parâmetros Litologia e Infiltração Preferencial.....   | 108 |
| Figura 4.11 – Mapas resultantes da classificação dos parâmetros Solo e FH.....  | 109 |
| Figura 4.12 – Mapa da taxa de recarga do método APLIS Adaptado.....   | 111 |
| Figura 4.13 – Mapas de recarga calculado pelo método APLIS adaptado, setorizado em regiões de cobertura de solo, de depressões cársticas e de maciços rochosos..... | 113 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 2.1 – Parâmetros de confecção das curvas chave e erro quadrado entre os valores de vazão medidos e calculados encontrados para cada estação de monitoramento. ....  | 32  |
| Tabela 2.2 – Comparação de $R^2$ médio entre as curvas-chave deste trabalho e com dados De Paula (2019).....   | 34  |
| Tabela 2.3 – Totais pluviométricos por ano hidrológico das estações representativas para o córrego Palmeira e demais córregos representados pela estação de Lagoa Santa.....   | 37  |
| Tabela 3.1 – Totais pluviométricos históricos e dos anos hidrológicos monitorados. ....  | 66  |
| Tabela 3.2 – Valores calculados de EXC e do volume total do EXC total calculado a partir da área de 505 km <sup>2</sup> da região estudada.....  | 67  |
| Tabela 3.3 – Valores de escoamento para as bacias estudadas durante os anos hidrológicos calculado através dos <i>softwares</i> BFI e HYSEP.....   | 70  |
| Tabela 3.4 – Valores de recarga e taxas de recargas para as bacias estudadas, calculados pelo método de Rorabaugh (1964) a partir do <i>software</i> RORA.....   | 72  |
| Tabela 3.5 – Valores de escoamentos calculados pelo método de Lyne e Hollick (1979) adaptado por Smakhtin (2001). Foi indicado o percentual dos escoamentos comparados com os escoamentos obtidos por Rorabaugh (1964). .... | 75  |
| Tabela 3.6 – Valores de recarga e taxa de recarga para as bacias estudadas obtidos por meio do método de Lyne e Hollick (1979) adaptado por Smakhtin (2001). ....  | 76  |
| Tabela 3.7 – Tabela contendo o resultado do valor médio de recarga por meio do método de Variação do Nível d’água (VNA) em cada poço observado, segundo a unidade hidrogeológica associada.....                              | 78  |
| Tabela 4.1 – Comparação das taxas mínima, média e máximas do método APLIS original e adaptado.....   | 112 |
| Tabela 4.2 – Comparação dos resultados das taxas de recarga setorizada por bacia hidrográfica. ....  | 112 |
| Tabela 4.3 – Resultado das taxas de recarga mínima, média e máxima calculadas pelo método APLIS adaptado, nas regiões onde predominam a cobertura de solo, os maciços e as depressões cásticas.....                          | 114 |
| Tabela 4.4 – Resultado das taxas de recarga médias calculadas pelo método APLIS adaptado. ....   | 115 |

## SUMÁRIO

|  |     |
|--|-----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 14  |
| 1.1 Objetivos.....   | 16  |
| 1.1.1 Objetivos Gerais .....   | 16  |
| 1.1.2 Objetivos Específicos .....  | 16  |
| 1.2 Justificativa.....   | 17  |
| <b>2 INTERPRETAÇÕES HIDROLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DAS BACIAS MISTAS E CARBONÁTICAS DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA, A PARTIR DA AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS</b> ..... | 19  |
| <b>3 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE RECARGA APLICADA AOS AQUÍFEROS FISSURAIS E CÁRSTICOS DA REGIÃO DA APA CARSTE DE LAGOAS SANTA, MG</b> .....   | 45  |
| <b>4 ESTIMATIVA DE RECARGA AQUÍFERA PELO MÉTODO APLIS ADAPTADO ÀS CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS FISSURAIS E CÁRSTICOS DA REGIÃO DA APA CARSTE DE LAGOAS SANTA, MG</b> .....                          | 89  |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | 120 |
| <b>6 REFERÊNCIAS</b> .....   | 123 |

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa apresentar a pesquisa realizada na região da Área de Proteção Ambiental (APA) Cárstica de Lagoa Santa, com foco na caracterização e estimativa de recarga pluvial, ou seja, na parcela de água pluvial que é infiltrada no subsolo e recarrega os aquíferos da região. Esta dissertação está vinculada ao “*Projeto de Adequação e Implantação de uma Rede de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Áreas com Cavidades Cársticas da Bacia do Rio São Francisco Aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais*”, que foi financiado pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV. O projeto é executado pelo IGC – Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, com apoio técnico do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM.

A área de pesquisa está no contexto das rochas carbonáticas e siliciclásticas da base da bacia do Bambuí, a citar a Formação Sete Lagoas e Serra de Santa Helena. Os metacalcários da Formação Sete Lagoas hospedam importantes aquíferos cársticos e cárstico-fissurais responsáveis por uma parcela importante do abastecimento urbano e industrial por poços profundos (DE PAULA, 2019). Dessa forma, conhecer a dinâmica de reposição natural da água subterrânea por meio da recarga é crucial para que sejam criados planos para a garantia do abastecimento de água da área.

Portanto, as perguntas científicas que objetivou-se responder neste trabalho foram: qual a taxa de recarga da região? A retirada de água do sistema por captações e bombeamentos influenciam na estimativa de recarga? Qual a taxa de recarga específica nas zonas de maciços rochosos e depressões cársticas?

Nesta pesquisa, foi realizada a estimativa de recarga aquífera por métodos já consagrados na literatura. Para o cálculo direto da recarga por meio dos dados de vazão das bacias, foi realizada a atualização das curvas-chave das seis principais bacias hidrográficas da área, a partir do monitoramento semiautomático das descargas de seções dos cursos durante quatro anos hidrológicos, de 2017/18 a 2020/21. Os métodos utilizados foram o de Rorabaugh (1964) baseado no deslocamento da curva de recessão, e o método de Lyne e Hollick (1979) baseado no parâmetro de filtro digital recursivo. Além disso, foi aplicado o método direto de recarga de Healy e Cook (2002) baseado na variação de nível d’água em 13 poços tubulares, monitorados durante o período de abril de 2018 a março de 2021.



Por fim, foi utilizado ainda um método de estimativa de recarga indireta pelo método APLIS, que foi adaptado para as condições do carste de climas tropicais e calibrado a partir dos resultados previamente obtidos pelos métodos de aplicação direta pelo monitoramento potenciométrico e fluvial.

Este trabalho foi relevante não só para a estimativa de recarga em si, mas também para a definição daqueles métodos que atingiram um resultado mais aderente para o carste, além da indicação dos pontos fortes e as fragilidades de cada um. Ademais, foi possível adaptar o método de recarga indireta de forma satisfatória, que apresentou como vantagens a sua fácil aplicação e o fato de não necessitar de uma rede de monitoramento implantada para implementação. Os resultados obtidos podem ser úteis para a replicação dos métodos em ambientes similares e para o manejo ambiental por órgãos gestores, ao indicar zonas estratégicas de recarga e, portanto, de alta relevância ambiental.

O trabalho foi organizado de forma a apresentar os resultados obtidos em formato de artigos científicos. O primeiro artigo buscou retratar a etapa do trabalho que consistiu na compilação, tratamento e interpretação dos dados primários de campo, do monitoramento das vazões dos principais córregos da área, a validação das curvas-chave das seções monitoradas e a obtenção dos hidrogramas dos córregos que subsidiaram a separação dos escoamentos e quantificação da recarga por métodos baseados nas descargas baciais. Além disso, foi realizada a interpretação do comportamento das vazões dos córregos pelos eventos de chuva e sua classificação entre bacias carbonáticas ou mistas.

O segundo artigo retratou os resultados a partir da aplicação dos métodos de aplicação direta pelos dados de descargas baciais, pelos métodos de Rorabaugh (1964) e Lyne e Hollick (1979), e também pelo método de quantificação da variação do nível d'água de poços de observação de Healy e Cook (2002), além da correlação e interpretação dos resultados.

O terceiro artigo científico sintetizou os resultados a partir da aplicação do método de quantificação indireta de recarga pelo método APLIS e a adaptação do método para as condições específicas do carste estudado, além de expor os resultados específicos para cada região e características específicas definidas.

Por fim, o capítulo final trouxe as recomendações para próximos estudos e as conclusões gerais do trabalho.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivos Gerais***

Este trabalho tem como objetivo principal estimar a recarga aquífera da área utilizando métodos diretos e indiretos, e avaliar aqueles que se enquadram melhor no ambiente cárstico em específico, as vantagens e fragilidades de cada método. Além disso, é proposto realizar as devidas adaptações aos métodos. Ademais, além de quantificar, pretende-se qualificar e setorizar as principais zonas de recarga e suas características particulares, além de definir a recarga específica nas áreas de maciços rochosos, nas depressões cársticas, nas regiões de solo e em cada litotipo mapeado.

### ***1.1.2 Objetivos Específicos***

Pontua-se os principais objetivos específicos deste trabalho:

1. Validação do monitoramento das descargas das seis principais bacias hidrográficas durante os ciclos de 2017/18 a 2020/21 e elaboração de suas curvas-chave atualizadas. Geração de hidrogramas das vazões dos córregos e interpretação do comportamento de cada bacia e as suas características específicas;
2. Aplicação dos métodos de Rorabaugh (1964), automatizado por Rutledge e Daniel (1994) e com base de dados diárias; e de Lyne e Hollick (1979), adaptado e automatizado por Smakhtin (2001) e com base de dados mensais para comparação de seus resultados. A aplicação destes métodos visou a obtenção da taxa de recarga representativa de cada bacia hidrográfica estudada;
3. Aplicação do método de estimativa de recarga de Healy e Cook (2002) e obtenção de índices de recarga setorizadas espacialmente e classificados por litotipos;
4. Tratamento e interpretação dos dados históricos de pluviometria, e aplicação do balanço hidroclimatológico de Thornthwaite e Mather (1955) para comparar os valores de excedente hídrico com os de escoamento superficial a fim de se estimar o impacto do bombeamento na área;
5. Aplicação do método APLIS original e adaptado a partir da classificação e definição dos pesos de importância dos parâmetros físicos da área que influenciam na recarga e da calibração dos resultados obtidos anteriormente pelos métodos de aplicação direta;

6. Obtenção do percentual de recarga específica para as áreas de maciços rochosos, coberturas de solo e para as depressões cársticas, além da setorização do percentual de recarga específica para cada litotipo mapeado na região;

7. Avaliação geral da aderência do método APLIS adaptado e demais métodos calculados para aplicação em áreas com contexto geológico, geomorfológico e hidrogeológico similares.

## **1.2 Justificativa**

Esta pesquisa é pertinente pois os resultados alcançados possuem relevância para a ciência, para a sociedade e também para a gestão ambiental por parte de instituições ambientais (Igam, CECAV e ICMBIO), os quais já vêm colaborando com a evolução das pesquisas desta região do trabalho.

A APA de Lagoa Santa foi criada no Decreto nº 98.881, de 25 de janeiro de 1990. O Artigo nº 2 do projeto prevê a garantia da conservação do conjunto paisagístico, preservação das cavernas e demais formações cársticas, a cobertura vegetal e a fauna silvestre. Em consonância com esse decreto, em 2012 o CECAV foi responsável pela coordenação e elaboração do “Plano de Ação Nacional para Conservação do Patrimônio Espeleológico nas áreas cársticas da Bacia do Rio São Francisco”, conhecido como PAN Cavernas do São Francisco, sendo que toda a área do projeto está inserida neste contexto.

Além do seu acervo paisagístico e espeleológico, há de se destacar os importantes aquíferos contidos nas rochas carbonáticas, responsáveis pelo abastecimento de importante parcela de água da comunidade local. Isso porque, até 2019 foram cadastrados pelo projeto 503 poços tubulares, dos quais 164 foram visitados em campanhas de campo durante todo o projeto. A vazão total outorgada em 2019 era de 6.857 m<sup>3</sup>/h e representa uma vazão média de 14 m<sup>3</sup>/h por poço.

O trabalho de Auler (1994) já apontava vários problemas relacionados à hidrogeologia dos sistemas cársticos, como a própria instalação desordenada e irregular de poços tubulares, a expansão de cidades, como Matozinhos, sobre a superfície cárstica, o crescimento da urbanização dentro da APA, a poluição hídrica, os desmatamentos, a contaminação por parte de produtos agrícolas e contaminação microbiológica nas zonas de recarga dos aquíferos.

Desta maneira, ao observar em trabalhos de campo atuais o mesmo cenário de degradação destas importantes regiões, especialmente as zonas de maior recarga, é reconhecido como cruciais os estudos visando nortear a melhor gestão dos recursos hídricos. Esta

preocupação e busca por melhoria deste recurso está de acordo com a Política Nacional das Águas instituída pela Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, cujos objetivos são assegurar a disponibilidade e a qualidade da água, dentre outros estabelecimentos.

A região estudada possui um valor cultural, arqueológico, paleontológico, histórico e paisagístico muito grande. Porém, é também uma região com uma economia ativa, especialmente por conta da mineração de calcário, da agropecuária, da indústria e do Aeroporto Internacional Tancredo Neves. Todos esses setores propiciam o aumento de regiões urbanizadas, do uso e ocupação do solo e também das fontes de poluição e contaminação. Por se encontrar no limite da Região Metropolitana de Belo Horizonte, é alvo também da poluição atmosférica e da poluição do rio das Velhas provinda dos centros urbanos.

Portanto, percebe-se que se trata de interesse nacional a preservação e a gestão desta área, e o impacto social desta pesquisa seria positivo ao propor justamente a melhor gestão, tanto das águas subterrâneas quanto superficiais. Sua importância para a ciência se assegura por propor a definição do método para o cálculo de recarga mais aplicável aos sistemas cársticos da APA Carste de Lagoa Santa e possíveis extrapolações em outros sistemas aquíferos carbonáticos.

Ainda, pretende-se contribuir de forma social e a favor da correta gestão dos recursos hídricos, ao realizar uma setorização das zonas de recarga mais suscetíveis à contaminação antrópica. As zonas de recarga, especialmente as de recarga direta, são naturalmente mais vulneráveis e de difícil recuperação. Portanto, a correta identificação destas zonas permitiria a sua proteção e a garantia da qualidade das águas subterrâneas.

## **2 INTERPRETAÇÕES HIDROLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DAS BACIAS MISTAS E CARBONÁTICAS DA APA CARSTE DE LAGOA SANTA, A PARTIR DA AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS.**

### **RESUMO**

A Área de Proteção Ambiental (APA) Cárstica de Lagoa Santa, localizada a cerca de 55 km de Belo Horizonte, Minas Gerais, foi criada por decreto federal em 1990, com a finalidade principal de normatizar o uso da terra a fim de preservar seu ecossistema e acervo espeleológico e arqueológico, além de monitorar seus recursos hídricos, de alta relevância para o abastecimento urbano e industrial. A região abriga importantes aquíferos cársticos e cárstico-fissurais do contexto das rochas carbonáticas e siliciclásticas das unidades basais da bacia do Bambuí. A fim de colaborar com a gestão e o monitoramento postulados pela criação da APA, foi instaurado uma rede de monitoramento fluviométrica nas principais bacias da APA e região, a citar as bacias do Jaque, Flor, Escrivânia-Gordura, Palmeira, Palmeira-Jaguara e Samambaia. O monitoramento visou estudar a evolução e o comportamento geral das bacias ao longo de quatro ciclos hidrogeológicos completos, de 2017 a 2021, a fim de evoluir os estudos do comportamento geral dessas bacias e suas relações entre água superficial e subterrânea, de forma a balizar, dentre outros estudos, aqueles envolvendo a recarga aquífera. Para tanto, foram geradas as curvas-chave de seções representativas, correlacionando as vazões medidas com dados de nível d'água, e produzindo hidrogramas com os dados de nível d'água obtidos de forma semiautomática por transdutores de pressão. Após a validação das curvas-chave e hidrograma gerados, foi possível constatar um aumento geral do nível de base das bacias, muito relacionado ao ciclo pluviométrico de 2019/20, e que se manteve elevado até o ano hidrológico seguinte. Os longos períodos de recessão sugerem uma reativação de dutos superiores a partir de 2019/20 e uma descarga lenta nas bacias Escrivânia-Gordura, Jaque e Samambaia, típico de um sistema cárstico complexo e com compartimentações verticais e horizontais. Além disso, as altas produtividades das bacias cársticas do Escrivânia-Gordura e Palmeira-Jaguara indicam a ocorrência de recargas alóctones, como defendido em estudos prévios. Foi constatado ainda que o comportamento da descarga das bacias Jaque e Flor revela que elas são mais bem caracterizadas como mistas, e não apenas pelíticas, como definido em estudos prévios. Por fim, constatou-se que a bacia do Escrivânia-Gordura é a mais produtiva da área e apresenta fluxos subterrâneos de fora da bacia, e que a bacia do Jaguara é a mais carstificada da área.

Palavras-chave: APA Carste de Lagoa Santa; monitoramento fluviométrico; curvas-chave.

## ABSTRACT

The Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area (EPA), located approximately 55 km from Belo Horizonte, Minas Gerais, was created by a federal decree in 1990 with the main purpose of regulating land use in order to preserve its ecosystem, speleological, and archaeological heritage, as well as monitoring its water resources, which are of high relevance for urban and industrial water supply. The region has important karst and karst-fissure aquifers within the context of carbonate and siliciclastic rocks of the basal units of the Bambuí basin. In order to contribute to the management and monitoring postulated by the creation of the EPA, a river monitoring network was established in the main basins of the EPA and the region, including the Jaque, Flor, Escrivânia-Gordura, Palmeira, Palmeira-Jaguara, and Samambaia basins. The monitoring aimed to study the evolution and general behavior of the basins over four complete hydrogeological cycles, from 2017 to 2021, in order to advance the understanding of the overall behavior of these basins and their relationships between surface water and groundwater, thus guiding, among other studies, those involving aquifer recharge. For that, key curves of representative sections were generated, correlating measured flows with water level data and producing hydrographs with water level data obtained semiautomatically by pressure transducers. After validating the generated key curves and hydrographs, it was possible to observe a general increase in the base level of the basins, strongly related to the rainfall cycle of 2019/2020, which remained elevated until the following hydrological year. The long recession periods suggest a reactivation of upper conduits starting from 2019/2020 and slow discharge in the Escrivânia-Gordura, Jaque, and Samambaia basins, typical of a complex karst system with vertical and horizontal compartmentalization. Additionally, the high productivity of the Escrivânia-Gordura and Palmeira-Jaguara karst basins indicates the occurrence of allochthonous recharge, as suggested in previous studies. It was also observed that the discharge behavior of the Jaque and Flor basins reveals that they are better characterized as mixed basins, rather than solely pelitic, as classified in previous studies. Finally, it was found that the Escrivânia-Gordura basin is the most productive in the area and exhibits groundwater flows from outside the basin, while the Jaguara basin is the most karstified in the area.

Keywords: Lagoa Santa Karst EPA; river monitoring; key Curves.

## 1 INTRODUÇÃO

A região de estudo localiza-se a aproximadamente 55 km a norte de Belo Horizonte, Minas Gerais, e possui uma área de 505 km<sup>2</sup>. Ela hospeda um importante centro histórico, cultural, arqueológico e paleontológico representado pelos terrenos pelítico-carbonáticos da base do Grupo Bambuí, e constitui uma das principais áreas de proteção ambiental do Brasil, denominada em 01/1991 como APA Carste de Lagoa Santa. A região integra o circuito das grutas de Minas Gerais, e apresenta mais de 1200 cavidades (CECAV, 2023), sendo a Gruta da Lapa Vermelha um dos sítios arqueológicos de maior importância para América do Sul, onde foi descoberto pelo naturalista Peter Wilhelm Lund no século XIX o fóssil humano de 11.500 anos, o mais antigo da América do Sul.

Dentre os estudos recentes elaborados na área, há de destacar os trabalhos de Kohler (1978) focado em geomorfologia, Auler (1994) com a definição de rotas de fluxo subterrâneas, Berbert-Born (1998) com estudos sobre geoquímica e Pessoa (2005) com o estudo de caracterização geral da hidrogeologia da região. Dentre os projetos desenvolvidos na área, destacam-se o Projeto Vida de Ribeiro *et al.*, (2003) que mapeou toda a área de estudo em uma escala de 1:50.000.

Vários foram os projetos desenvolvidos na região, com destaque para os projetos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), como o Projeto APA Carste Lagoa Santa de Viana *et al.* (1998) e o Projeto Vida de Ribeiro *et al.* (2003), e o Projeto PAN San Francisco Caves, de Velásquez *et al.* (2018), que desenvolveu diversos estudos focados nos estudos sobre hidroquímica, isótopos, modelo conceitual e numérico, pedologia, parâmetros hidrodinâmicos, mapeamento geológico e geomorfológico, entre outros.

Apesar da relevância da região, a área é marcada pelo avanço da urbanização e aumento da impermeabilização do solo. É também o lugar onde foi instalada a primeira aertrópolis do Brasil, a partir da instauração do aeroporto de Confins. Além disso, a área é caracterizada pela presença de mineração de calcário, da agropecuária e da indústria. Dessa maneira, e sabendo-se que o sistema cárstico é intrinsecamente mais vulnerável à poluição, o trabalho aqui ressalta a importância de se conhecer a dinâmica entre a água superficial e subterrânea a partir do aprofundamento nos conhecimentos dessas regiões de recarga e na determinação da parcela de água que é, de fato, recarregada para o aquífero.

Para isso, foi realizado o monitoramento das descargas das seis principais bacias da região, no período de 2016 a 2021, de modo a avaliar o comportamento dos cursos d'água da região e a relação entre as águas superficiais e interação com o sistema subterrâneo. Para tanto,

foram atualizadas as curvas-chave dos córregos e analisada sua aderência com as vazões medidas em campo e com as curvas-chave elaboradas inicialmente por De Paula (2019) para um período menor de monitoramento.

Após a validação das curvas, foram gerados os hidrogramas das vazões dos córregos obtidos pelo monitoramento semiautomático por transdutores de pressão. A partir disso, realizou-se a interpretação das vazões monitoradas utilizando análises baseadas em estatística analítica dos eventos de periodicidade diária, anual e para o período completo de monitoramento, a fim de interpretar o comportamento e as características de cada bacia. As análises dos dados primários são fundamentais para embasar estudos mais aprofundados envolvendo a análise dos escoamentos superficiais e de base, e estimativas mais precisas de recarga.

## **2 CONTEXTUALIZAÇÃO FÍSICA**

A região de estudo engloba parcialmente ou totalmente os municípios de Vespasiano, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Confins, Capim Branco, Prudente de Moraes e Funilândia (Figura 2.1). Seus limites são demarcados a norte e noroeste pelos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena; a oeste e sul pelo ribeirão da Mata, caracterizado por um contato hidroestrutural, pois está alocado sobre um sistema de estrutura rúptil e delimita o contato entre as rochas cristalinas do Complexo Belo Horizonte e carbonatos do Grupo Bambuí (TEIXEIRA, PENA E SILVA, 2020). A sudoeste e leste é limitada pelo contato com as rochas metapelíticas e pelo rio das Velhas, que funciona como fluxo de base para o aquífero carbonático, e é local de descarga de quase todos os cursos d'água da região.



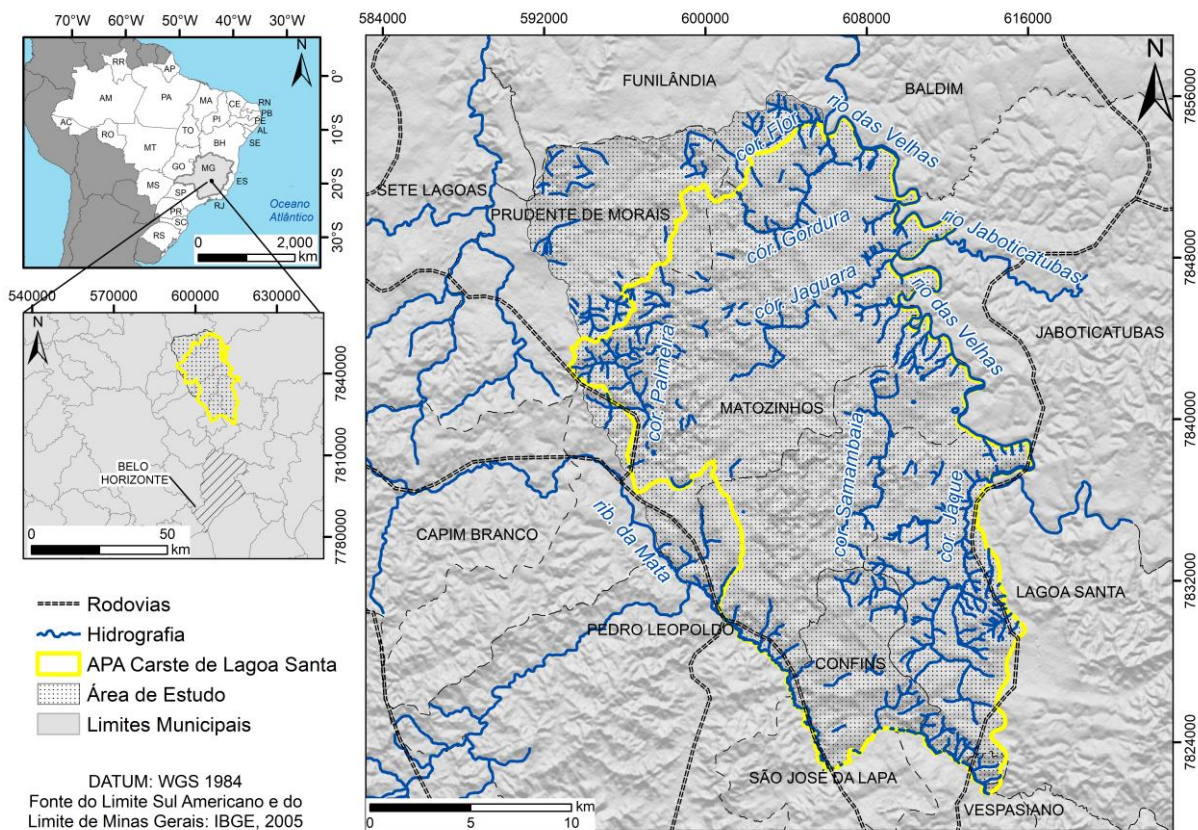


Figura 2.1 – Mapa de Localização da área de estudo com destaque para região da APA Carste de Lagoa Santa, a área de estudo, a hidrografia da região e as rodovias de acesso.

## 2.1 Hidrografia

A região é bordejada a leste pelo rio das Velhas, rio de maior extensão pertencente à bacia hidrográfica federal do rio São Francisco. A nível local, a área é formada por onze sub-bacias hidrográficas: Flor, Escrivânia-Gordura, Palmeira-Jaguara, Palmeira, Margem Velhas, Samambaia, Bom Jardim, Margem Ribeirão da Mata, Confins, Retiro e Jaque. Uma característica marcante é a pouca densidade de drenagens superficiais (Figura 2.1) e a predominância de uma rede de drenagem subterrânea (DE PAULA, 2019). O padrão retangular destas drenagens é observado em quase todos os cursos d'água. O sentido de fluxo destas drenagens é preferencialmente para leste, rumo ao rio das Velhas, e indica um forte controle estrutural.

As principais bacias hidrográficas da área, e foco de estudo deste trabalho, são os córregos Flor, Gordura, Palmeira, Jaguará, Jaque e Samambaia. O córrego Flor é do tipo mista, já que há mistura de águas provenientes do metapelito e do carbonato. As vazões médias são baixas, de  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  e uma área pequena de  $16 \text{ km}^2$ . Este córrego é bastante afetado por retiradas antrópicas de água, e chega e ficar seco nos meses de estiagem (DE PAULA, 2019).

O córrego Gordura apresenta altas vazões, com média de 0,88 m<sup>3</sup>/s. Suas nascentes estão no carbonato. Este córrego forma a bacia hidrogeológica denominada Escrivânia-Gordura, com área de abrangência de 96 km<sup>2</sup>. A bacia da Escrivânia possui uma única nascente, que imerge em um sumidouro e emerge na bacia do Gordura, formando assim o compartimento Escrivânia-Gordura (VELÁSQUEZ *et al.*, 2018).

A bacia do córrego Palmeira é carbonática e intensamente carstificada, apresenta uma área de 31 km<sup>2</sup> e vazão média de 0,02 m<sup>3</sup>/s. Esse córrego apresenta uma direção de fluxo diferente dos demais córregos, e forma, juntamente com o córrego Jaguará, a bacia hidrogeológica Palmeira-Jaguará, definido assim por Auler (1994) devido às conectividades de fluxo entre esses dois sistemas. O córrego Jaguará, por sua vez, apresenta a maior média de vazão da área, de 0,98 m<sup>3</sup>/s, e é uma bacia carbonática. Por fim, o córrego Samambaia apresenta uma vazão média de 0,24 m<sup>3</sup>/s e uma área de 48 km<sup>2</sup> e forma uma bacia tipicamente carbonática, diferentemente do córrego Jaque, que recebe contribuições do metapelito e do metacalcário, sendo, portanto, uma bacia mista, com vazão média de 0,34 m<sup>3</sup>/s e uma área de 59 km<sup>2</sup>.

## 2.2 Clima

Como o foco deste trabalho é o tratamento dos dados de monitoramento de vazão e a relação de água superficial e subterrânea, é indispensável a apresentação da classificação climatológica para área. Segundo Köppen-Geiger (1928), o clima da região é tipicamente Tropical Úmido (Aw). Existem duas estações definidas: inverno seco, de abril a setembro, e verão chuvoso, de outubro a março, e a temperatura média da região é de 18°C (VIEIRA, 2015).

Para a análise da série histórica da precipitação anual, considerou-se o período de 1980 a 2021. As estações analisadas foram a de Lagoa Santa (1943049), Vespasiano (19430400), Pedro Leopoldo (1944009) e Sete Lagoas (OMM:8670). A partir do mapa de Thiessen (Figura 2.2), foi calculada a porcentagem da área de abrangência de cada estação. Considerando as proporções calculadas pelo mapa de Thiessen, a média de precipitação anual para o período histórico de 1980 a 2021, foi de 1173 mm.

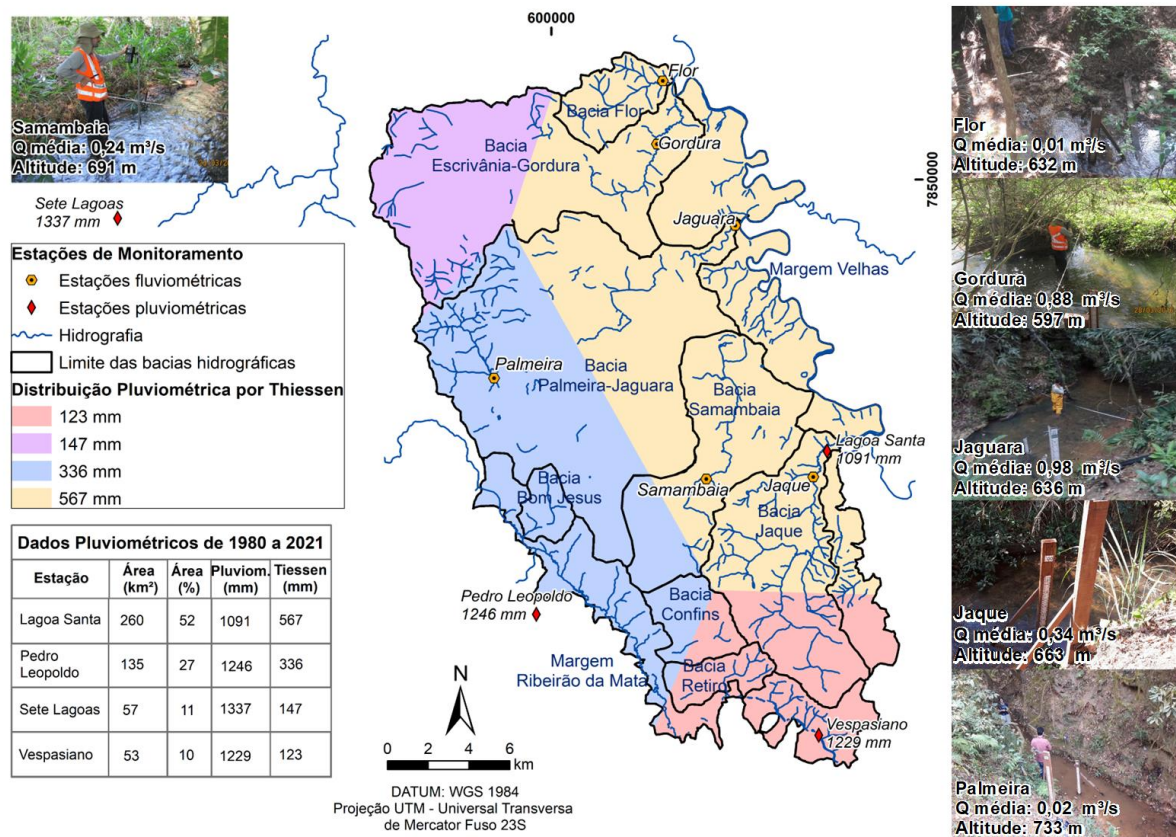


Figura 2.2 – Mapa de Thiessen da área de estudo considerando as estações de Sete Lagoas, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Vespasiano. Foram indicadas também as bacias hidrográficas, a rede de drenagem e as estações de monitoramento pluviométrico e fluviométrico, além de fotos do local de medição de vazão dos córregos.

### 2.3 Geomorfologia

A área de estudo é marcada por dois domínios geomorfológicos principais, segundo Viana *et al.* (1998), e estão condicionados às duas formações litológicas mais presentes da área. O domínio predominante está relacionado às feições cársticas das formações rochosas calcáreas, e apresenta feições como dolinas, uvalas, sumidouros, paredões rochosos, muitas vezes com cavernas e condutos, além de outras feições típicas. O segundo domínio geomorfológico está condicionado à formação rochosa pelítica da área, e formam relevos mais aplainados. Sua geomorfologia reforça o controle estrutural da área e o desenvolvimento cárstico, pois a rede de drenagem apresenta o mesmo padrão retangular nos dois domínios geomorfológicos, e indica um controle mais profundo e menos superficial relacionado às estruturas rúpteis.

### 3 GEOLOGIA

A área de estudo está inserida no contexto da bacia intracratônica do São Francisco. O cráton São Francisco é uma unidade neoproterozoica individualizada durante a orogenia Brasiliana (ALKMIM, NEVES e ALVES, 1993), e faz parte da porção ocidental do Cráton Congo-São Francisco, fragmentado durante a abertura do Oceano Atlântico.

A bacia do São Francisco é constituída por uma cobertura de rochas clásticas e carbonáticas neoproterozoicas, correspondentes ao Supergrupo São Francisco. Para alguns autores, a base do Supergrupo São Francisco é composta por uma unidade glacial basal pertencente à Formação Carrancas, e coberta pela sucessão carbonática do Grupo Bambuí (DARDENNE, 1978; KARFUNKEL e HOPPE, 1988; UHLEIN, TROMPETTE e ALVARENGA, 1999; MARTINS-NETO, PEDROSA-SOARES e LIMA, 2001).

No entanto, estudos mais recentes de Delpomdor *et al.* (2020) sugerem uma nova interpretação e classificam a base conglomerática como sendo uma lente intraformacional da unidade base do Grupo Bambuí. O Grupo Bambuí, por sua vez, é composto, da base para o topo, pelas unidades da Formação Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e pela Formação Três Marias.

Localmente, a estratigrafia é representada pelo embasamento cristalino gnáissico-granítico-migmatítico do Complexo Belo Horizonte. É composta por rochas leucocráticas, com presença marcante de quartzo, feldspato, e muito pouco ou quase nenhuma biotita (RIBEIRO *et al.*, 2003).

As unidades aflorantes do Grupo Bambuí na área são compostas pelas Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena e abrangem a maior parte da área (Figura 2.3). A Formação Sete Lagoas, por sua vez, é dividida em dois membros: Membro Pedro Leopoldo e Lagoa Santa. Enquanto o Membro basal Pedro Leopoldo corresponde a um metacalcário de granulação fina impuro, composto, além da calcita, por sericita e quartzo, o Membro Lagoa Santa, no topo, constitui um metacalcário composto por um teor acima de 90% de calcita, devido ao elevado teor de pureza deste membro, e por isso as feições de carstificação se apresentam mais concentradas neste membro. Porém, ele pode conter certas impurezas, como sulfetos, sericita e quartzo, especialmente próximo ao contato com a Formação Serra de Santa Helena (TEIXEIRA, PENA e SILVA, 2020).

A unidade de topo do Grupo Bambuí aflorante na área é composta pela Formação Serra de Santa Helena, presente principalmente nas regiões oeste da área. Essa unidade aflora como um metapelito, geralmente muito intemperizado, composto por argilominerais e quartzo. A



rocha apresenta uma granulometria fina e uma foliação formada pelos planos dos minerais filossilicatos. É comum a presença de veios de quartzo paralelos ao acamamento.

No topo da estratigrafia estão as coberturas detrítico-lateríticas, de granulometria variada e que formam concreções limonitizadas ou em forma de um solo laterítico contendo caulim. Além disso, a região é composta por coberturas aluvionares que margeiam os principais cursos d'água da área. Essas coberturas formam depósitos de granulometria variada contendo sedimentos de minerais como quartzo, além de fragmentos rochosos.

Em campo, os metapelitos e coberturas se misturam com os solos e recobrem grande parte dos calcários da região, e geram uma região cárstica com cobertura de espessura média de 40 metros, conforme medições de De Paula (2019).

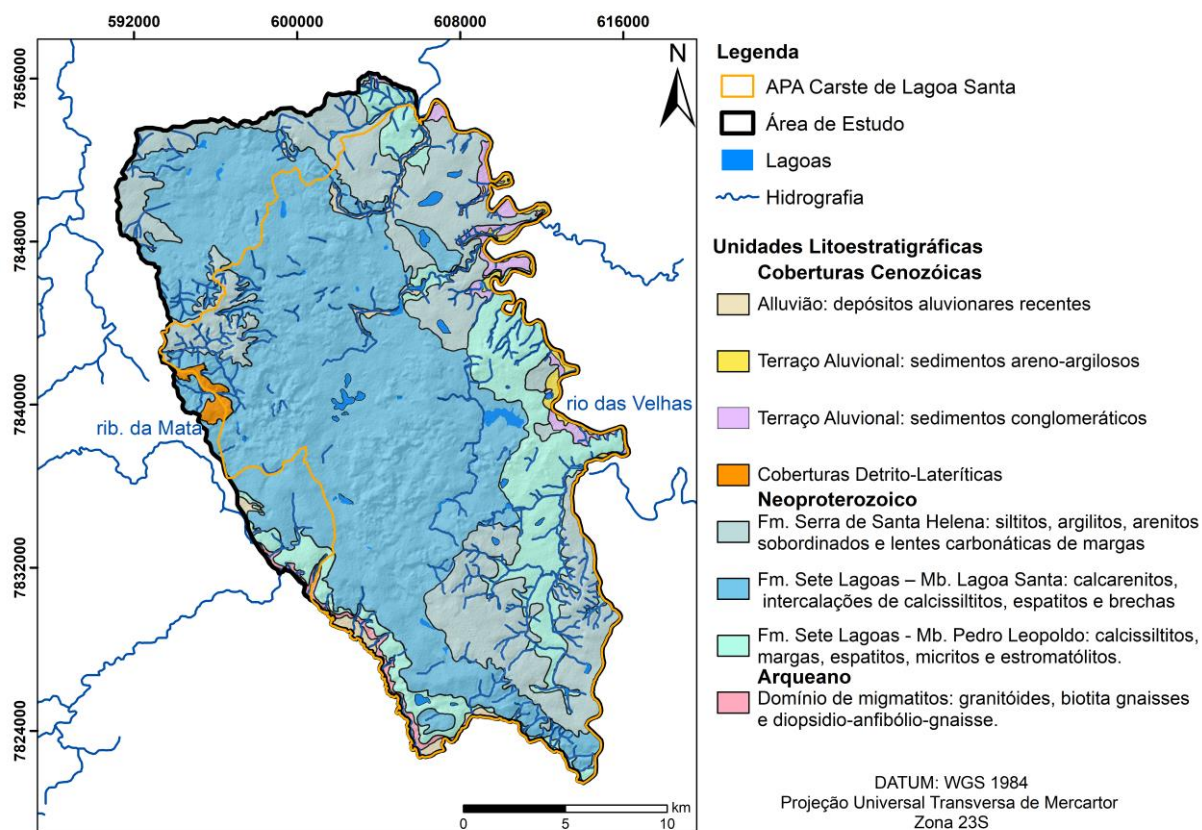


Figura 2.3 – Mapa geológico da região de estudo. Retirado de Ribeiro *et al.* (2003) e modificado por trabalhos de Vieira (2015) e Ribeiro *et al.* (2016) com destaque para região da APA Carste.

Estruturalmente, há predominância de estruturas rúpteis representadas por famílias de fraturas, que são evidenciadas em todas as rochas, mas facilmente reconhecidas no membro mais carstificado. Conforme descrito por Ribeiro *et al.* (2016), e posteriormente por De Paula (2019), as fraturas de alto ângulo nos carbonatos funcionam como mecanismo de recarga que direcionam a água meteórica para o meio subterrâneo. Quando estas fraturas

interceptam uma estrutura planar sub-horizontal, o processo de dissolução evolui e gera os condutos cársticos com gradiente hidráulico para o rio das Velhas.

#### 4 HIDROGEOLOGIA

A hidrogeologia da área é caracterizada principalmente pela existência de aquíferos carbonáticos, estudados no Brasil a mais de 70 anos. Inicialmente, o foco dos estudos era a geomorfologia destas rochas, e destacam-se os trabalhos pioneiros de Tricart (1956), Barbosa (1961), Kohler *et al.* (1978) e Piló (1989). Contudo, com avanços tecnológicos e dos conhecimentos sobre essas rochas e de seus sistemas aquíferos, a década seguinte foi marcada por avanços nos estudos hidrogeológicos e hidroquímicos, com destaque para os trabalhos de Auler (1994) e Piló (2000). Mais recentemente, o detalhamento de estudos hidrogeoquímicos e geomorfológicos para a compreensão e monitoramento de fluxos de água nestes terrenos se intensificaram com os trabalhos de Silva (2003), Pessoa (2005), Batista (2009), Carneiro (2013), Galvão (2015), Velásquez *et al.* (2018) e De Paula (2019).

Ao considerar os aspectos geológicos, estruturais, litológicos, estratigráficos e morfológicos das rochas, De Paula (2019) discriminou quatro unidades hidroestratigráficas, correspondentes às unidades do Cristalino, de Sete Lagoas, da Serra de Santa Helena e das Coberturas.

Em se tratando da interação de água superficial e subterrânea, estudos de De Paula e Velásquez (2020) constataram uma grande correlação entre o sistema de água superficial e subterrânea, a partir da análise de correlação cruzada entre dados de pluviometria e da vazão dos cursos d'água. Para as bacias analisadas, De Paula (2019) obteve valores de correlação de 1 a 4 dias para o sistema causa-efeito, tendo as bacias carbonáticas uma resposta mais rápida, menores até que 1 dia, após os eventos pluviométricos. Para validação dos dados matemáticos, o autor comparou os resultados da bacia Escrivânia-Gordura com ensaios diretos de traçadores corantes realizados por Teodoro *et al.* (2019). Estes últimos obtiveram valores de resposta de 23 horas, contra 1 dia encontrado por De Paula, a partir de análise de correlação cruzada.

Com relação à recarga, em ambientes cársticos, ela pode ocorrer de forma alogênica (água externa ao sistema) e de forma autogênica (água é proveniente do próprio sistema). A recarga autogênica pode resultar da infiltração da água dos aquíferos suspensos, ou através do escoamento interno em sumidouros (WHITE, 2002). Em relação à recarga alogênica, para a área de estudo, Teixeira, Pena e Silva (2020) destacam uma zona de recarga importante para a

região de estudo, proveniente da surgência Bom Jardim na porção centro-oeste da área de estudo.

Estudos de Galvão, Hirata e Conicelli (2018) nos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena em Sete Lagoas (MG), a noroeste da área de estudo, mostrou que as porções com maior potencial para recarregar o aquífero são as regiões com cobertura de solos mais arenosos, regiões com declives < 2%, ou entre 2-7%, e regiões com cobertura florestal. De forma geral, essa unidade não é muito produtiva na área de estudo, no entanto, apresenta a função de recarregar o aquífero cárstico e o cárstico-fissural.

De Paula e Velásquez (2019) realizaram o balanço hídrico e a análise de recarga do sistema aquífero, e estimaram valores de recarga líquida de 12 a 164 mm/ano, com média de 119 mm, o que representa 12% do total pluviométrico. Nesse mesmo estudo, os autores calculam o balanço de massa considerando as retiradas antrópicas e entradas autóctones. Os valores apresentados mostraram que, apesar da região ser uma das principais áreas de proteção cársticas do país, as retiradas antrópicas são maiores que a recarga líquida pluvial.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o cálculo da recarga a partir do escoamento de base do curso d'água, é necessário primeiramente a formulação do seu hidrograma, que relaciona a variação da vazão de um afluente em determinado período. Para a construção de hidrogramas, são necessárias medições de vazão por períodos prolongados, de no mínimo um ano hidrológico. Neste trabalho, adotou-se um monitoramento semiautomático, por transdutores de pressão, durante quatro anos hidrológicos consecutivos, com monitoramento das vazões *in loco*.

Para as medições das vazões de um curso d'água, pode-se utilizar, dentre outros instrumentos, o *flowtracker*, o molinete e o micromilnete, que são equipamentos específicos para medição de vazão. Outro método convencional para aferição da vazão é a utilização de um material flutuador, com o qual se mede o tempo que esse material demora para percorrer uma distância conhecida. Esse método é muito utilizado para cursos d'água de menor vazão. A definição do método e equipamento a ser utilizado baseia-se, dentre outras variáveis, na extensão do corpo d'água, na precisão necessária e nos recursos disponíveis (ALMEIDA *et al.*, 2010).

Foram empregadas medições de vazão das principais drenagens da região, nos córregos Flor, Jaguara, Gordura, Palmeira, Samambaia e Jaque. Foi utilizado majoritariamente o micromolnete para medição da vazão nos córregos Jaguara, Gordura, Samambaia e Jaque, pois

se trata de córregos com vazões maiores do que os córregos Flor e Palmeira, onde foi aplicado o método com molinete ou medição com flutuador. O *flowtracker* foi utilizado pelo menos uma vez por ano para aferição e comparação com os resultados do micromolinete.

Foram definidos os pontos fluviométricos desses seis córregos, e instaladas réguas linimétricas para a aferição do nível d'água nessas estações. O produto da área dessa seção transversal com a velocidade média do curso d'água (medida com micromolinete) ao longo dessa seção forneceu a sua vazão, ou, em outras palavras, a sua descarga.

A medição da vazão ocorreu entre os períodos de 2017 a 2021. Em relação aos valores de nível d'água, foram instalados transdutores de pressão nos seis córregos, em sistemas como o ilustrado na Figura 2.4. Os transdutores de pressão foram programados para armazenar as medidas de pressão a cada hora, e essas medidas foram, posteriormente, convertidas em nível d'água.



Figura 2.4 – Exemplo de estação fluviométrica instalada nos córregos Samambaia (foto a esquerda) e Jaguará (foto a direita), com indicação das réguas instaladas e dos equipamentos instalados para armazenar o transdutor de pressão.

A partir da medição manual das vazões e do nível d'água das réguas, foi possível atualizar as curvas-chave dos córregos. De Paula (2019) havia elaborado as curvas-chave entre os períodos de 2016 e 2018, e, a partir das medições realizadas entre o final de 2020 e início de 2021, elas foram atualizadas e os resultados comparados com as curvas anteriores a partir da análise do erro quadrático entre as duas medidas, a fim de validar ou refutar a curva atual.

Curvas-chave são representadas de forma gráfica, relacionando a vazão, plotadas nos eixos das abscissas, com a altura do nível d'água das réguas, plotadas nos eixos das ordenadas. Esse ajuste entre os dados de cota e vazão foi realizado considerando-se o método de extrapolação logarítmica descrito por Santos *et al.* (2001), conforme a Equação 1:

$$Q = a(h - h_0)^b \quad (1)$$

Sendo Q a descarga (vazão), “h” a lâmina d'água relativa ao Q medido, “h<sub>0</sub>” é a medida da lâmina d'água para qual obtêm-se o valor de Q nulo. Já as constantes “a” e “b” são



parâmetros de ajuste específico de cada seção fluviométrica. Os parâmetros de ajustes são encontrados a partir de uma função não linear que apresente a menor diferença quadrada entre as vazões medidas empiricamente e a calculada pela função.

Utilizou-se, para isso, a ferramenta *Solver* disponível no *software MS Excel*, e obteve-se uma equação não linear que mais se aproximava dos valores de vazão medidos em campo. Foram removidas as medidas de vazão que obtiveram o maior erro quadrado entre o Q medido e o calculado, a fim de se obter melhor aderência na curva. Uma condição importante para a formulação da equação é que o valor de “h0” deve ser menor ou igual à menor medida de régua realizada em campo.

Após a construção das curvas-chave e a obtenção das vazões durante o ciclo hidrológico de quatro anos, foram obtidos hidrogramas que foram analisados com o objetivo de se avaliar a relação da água superficial e a subterrânea nas bacias. Para essas análises, foram realizadas interpretações com base em estatística descritiva e na análise dos diagramas em eventos diários, anuais e para o período completo, baseando-se também nas características das bacias.

Para a análise dos dados de precipitação, foram utilizados os dados pluviométricos das seguintes estações pluviométricas: Vespasiano (1943009), Pedro Leopoldo (1944009), Ponte Raul Soares (1943049) e Sete Lagoas (1944052). Suas localizações espaciais são indicadas na Figura 2.2. Os dados das estações estão disponíveis nas plataformas digitais da Agência Nacional das Águas – ANA (2022) e do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2022).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como base no monitoramento de cota e de vazão, foram confeccionadas as curvas chaves dos córregos monitorados. Os parâmetros das curvas-chaves de cada estação de monitoramento estão assinalados na Tabela 2.1 e as curvas-chaves representadas na Figura 2.5. Percebe-se que o erro quadrado ( $R^2$ ) entre os valores de vazão medidos em campo e calculados pelo *Solver* utilizado foram todos acima de 0,80, o que indica uma boa aderência das curvas.

Devido à boa adesão das curvas, elas foram consideradas válidas e aplicadas nos dados de monitoramento da régua obtidos por meio dos transdutores de pressão, e produziram valores de vazão que foram utilizados para confecção dos hidrogramas das bacias que serão apresentados posteriormente.

Tabela 2.1 – Parâmetros de confecção das curvas chave e erro quadrado entre os valores de vazão medidos e calculados encontrados para cada estação de monitoramento.

| Estações de Monitoramento | a        | b     | h <sub>0</sub> | R <sup>2</sup> |
|---------------------------|----------|-------|----------------|----------------|
| Córrego Palmeira          | 3,14     | 11,25 | -1,11          | 0,80           |
| Córrego Flor              | 1067,22  | 2,28  | -0,04          | 0,83           |
| Córrego Samambaia         | 0,04     | 12,77 | -1,83          | 0,86           |
| Córrego Gordura           | 4756,21  | 0,39  | 0,19           | 0,88           |
| Córrego Jaguará           | 16709,09 | 2,42  | 0,00           | 0,96           |
| Córrego Jaque             | 4361,06  | 1,22  | 0,07           | 0,99           |

h<sub>0</sub> corresponde ao nível d'água para qual a vazão é nula, "a" e "b" são constantes lineares determinadas para o local e R<sup>2</sup> corresponde ao erro médio quadrado.

Como pode se observar na Figura 2.5, existem alguns pares de pontos com paralelismo vertical dentro de um mesmo hidrograma, o que indica uma dispersão de mais de 10% de vazão monitorada para uma mesma coluna d'água. Isso pode ser exemplificado pelo par de ponto da base do córrego Gordura e o par de ponto no meio do gráfico do córrego Jaguará. Essa relação de mesma cota para variação de vazão está ligada ao erro de medida durante o monitoramento manual da vazão. Contudo, como o R<sup>2</sup> destas duas curvas foi superior a 0,85, foram considerados os pontos durante a geração da curva, uma vez que não foi possível identificar qual das medidas mais se aproximava da realidade. Apesar de dispersões observadas em outros pontos nos gráficos das curvas-chave, nenhuma outra anomalia foi observada na geração da curva, e aponta a validade das medições de vazão realizadas e, conseqüentemente, sua utilização para confecção das curvas apresentadas.

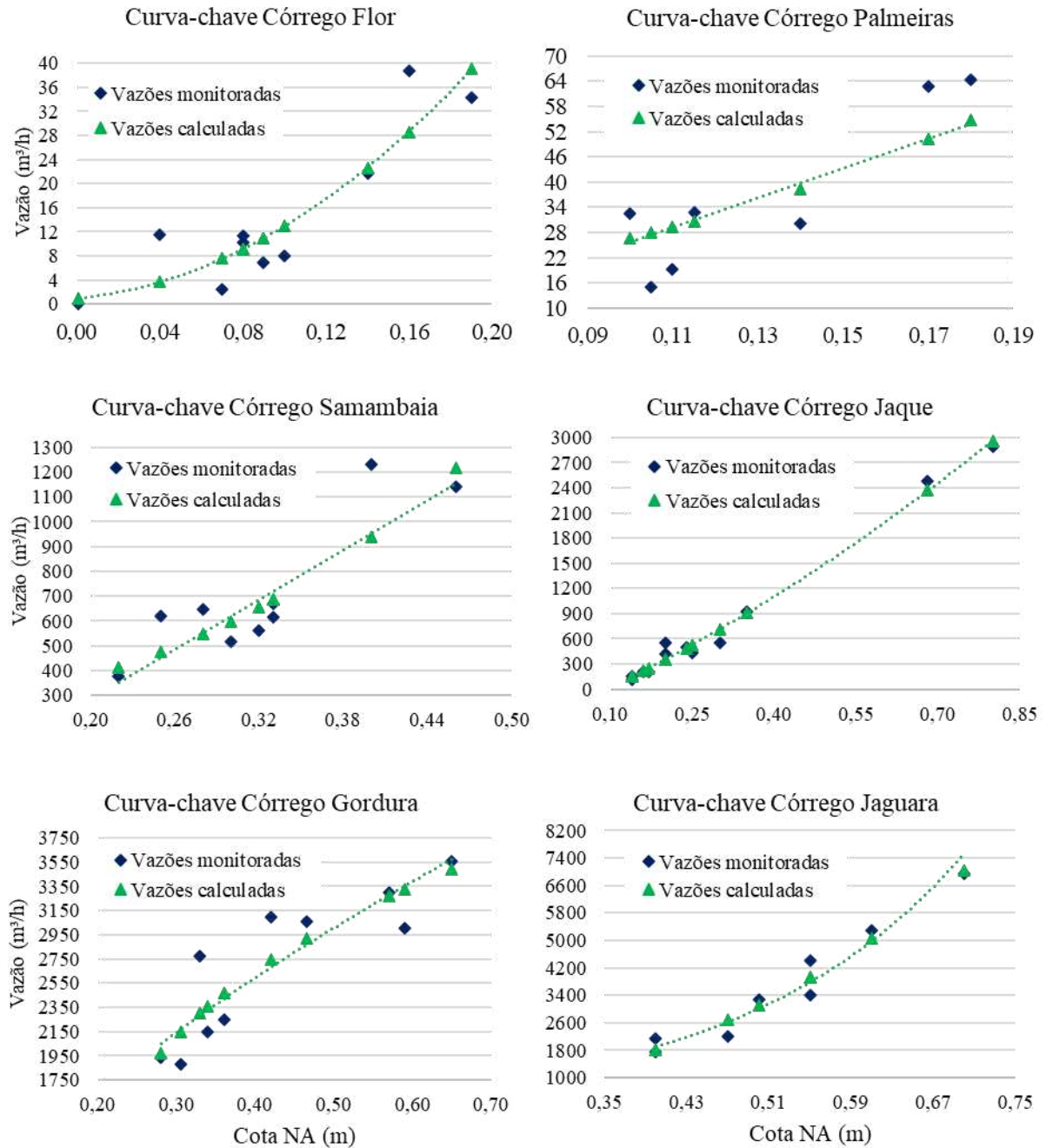


Figura 2.5 – Curvas chaves atualizadas das vazões monitoradas entre o período de 2016 a 2021 dos córregos Flor, Palmeira, Samambaia, Jaque, Gordura e Jaguará.

As medições das vazões podem ser prejudicadas por atividades antrópicas (ocorrência de captações expressivas durante o curso d'água, realizações de barramentos), por alterações naturais (grande variação de precipitação anual comparado com o período de realização das curvas), ou até mesmo por conta de modificações das seções no ponto de medição das vazões. Por conta disso, foi testada a validade destas curvas durante o período de monitoramento e comparadas as curvas com as de De Paula (2019).

Para tanto, realizou-se a comparação entre os erros quadráticos médios das curvas-chave de De Paula (2019) com as curvas-chave atualizadas neste trabalho (Tabela 2.2). Há de ressaltar que o monitoramento de De Paula (2019) compreendeu os anos hidrológicos de 2016-2018, e o trabalho atual de 2017-2021, e apresentam um ano hidrológico de correspondência.

Tabela 2.2 – Comparação de  $R^2$  médio entre as curvas-chave deste trabalho e com dados De Paula (2019).

| Estações de Monitoramento | $R^2$ (Da autora) | $R^2$ (De Paula, 2019) | $R^2$ (entre as curvas) |
|---------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|
| Córrego Palmeira          | 0,80              | 0,76                   | 0,74                    |
| Córrego Flor              | 0,83              | 0,78                   | 0,85                    |
| Córrego Samambaia         | 0,86              | 0,77                   | 0,90                    |
| Córrego Gordura           | 0,88              | 0,96                   | 0,95                    |
| Córrego Jaguará           | 0,96              | 0,91                   | 0,75                    |
| Córrego Jaque             | 0,99              | 0,97                   | 0,98                    |

De modo geral, com exceção do córrego Gordura, os dados produzidos neste trabalho apresentam uma maior aderência que os calculados por De Paula (2019). Esse fato pode estar relacionado ao tempo de monitoramento, já que o trabalho atual realizou um monitoramento por um período duas vezes maior do que o trabalho de De Paula (2019), e por isto apresenta uma variabilidade maior de pontos em relação às variações sazonais. Desta forma, entende-se que o número de anos hidrológicos monitorados é um fator importante para construção de curvas mais robustas.

Há de ressaltar ainda que, de maneira geral, as vazões calculadas neste trabalho, principalmente para o período de 2019/20 foram maiores, por conta do registro de maiores índices pluviométricos. Dessa forma, as vazões nos períodos de chuva monitoradas por De Paula (2019) foram mais baixos do que os anos posteriores. Portanto, as referências de vazões para o período chuvoso deste trabalho aproximam-se mais da realidade das bacias. A falta de dados de vazão mais representativos do período chuvoso no período monitorado por De Paula (2019) durante a realização da curva pelo *solver* pode ter superestimado a relação entre régua e a vazão para valores mais altos, justamente por não ter referências reais de medidas nestas condições. Este problema foi melhor sanado neste trabalho, já que pôde ser calibrado com os dados mais representativos de régua e de vazões mais altas.

Quando se compara o erro entre as curvas, percebe-se que os córregos Palmeira e Jaguará apresentaram um  $R^2$  menor ou igual a 0,75. O primeiro córrego demonstrou uma influência direta com a captação superficial antes do ponto monitorado. Já o segundo córrego exibiu uma maior variação de vazão no último ano hidrológico (2020/21), não monitorado por De Paula (2019). Essa comparação é relevante para apresentar a validade das curvas-chave ao

passar dos anos e a constante necessidade de atualizações. Ao considerar um  $R^2$  maior que 0,75 como uma curva válida, conforme adotada por De Paula (2019), todas as curvas apresentadas neste trabalho foram respaldadas de 2016 a 2021 ( $R^2$  maior 0,80).

Já as curvas dos córregos Palmeira e Jaguará do trabalho de De Paula (2019) já não podem ser aplicadas após o ano hidrológico de 2017/18, pois o córrego Palmeira, quando aplicada à nova equação obtida neste trabalho, obteve um  $R^2$  de 0,74. Já o córrego Jaguará apresentou uma grande dispersão dos dados, e o  $R^2$  de 0,97 diminuiu para 0,75 quando aplicada a nova equação.

Uma vez ratificados os dados de monitoramento e as curvas durante o ciclo de quatro anos, os dados de monitoramento por transdutores de pressão foram empregados nas curvas-chaves para a confecção dos hidrogramas (Figura 2.6) e correlacionados com os eventos pluviométricos de modo a denotar uma relação entre águas superficial e subterrânea.

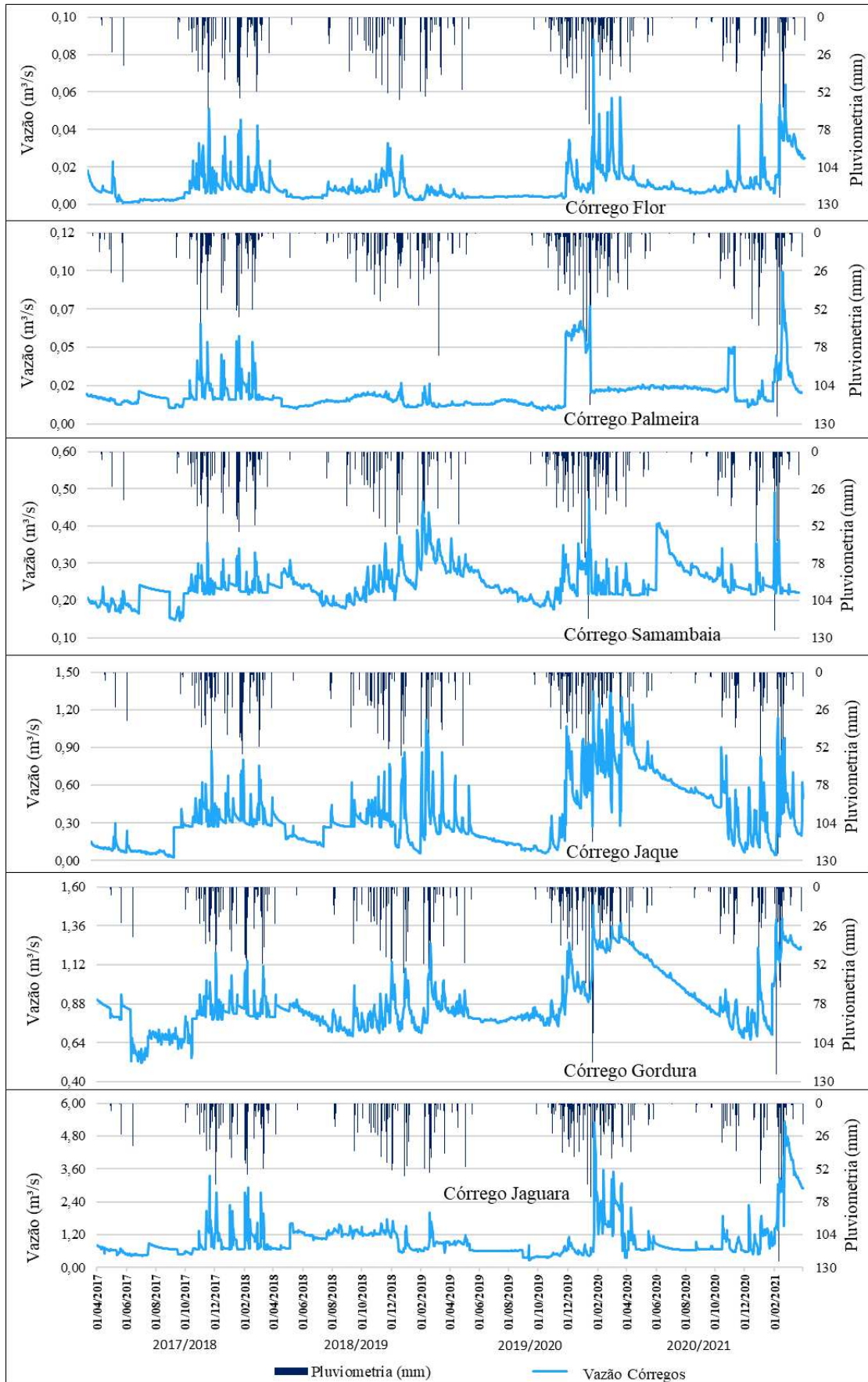


Figura 2.6 – Hidrogramas de vazão de monitoramento dos anos hidrológicos de 2017 a 2021 dos córregos Flor, Palmeira, Samambaia, Jaque, Gordura e Jaguará.

Para realizar a análise dos hidrogramas, deve-se primeiramente definir os totais pluviométricos dos anos hidrológicos (Tabela 2.3). O córrego Palmeira foi separado dos demais porque ele apresenta a estação pluviométrica de Pedro Leopoldo como a de maior abrangência na bacia, enquanto as demais a estação Lagoa Santa é a de maior abrangência.

Observa-se nas duas estações que o ano hidrológico de 2019/20 caracteriza-se como um ano chuvoso, com valores 15% maiores que a média (1173 mm/ano), enquanto os demais anos apresentam uma variação próxima de 10%, acima ou abaixo da média histórica, a depender do ano e da estação.

Tabela 2.3 – Totais pluviométricos por ano hidrológico das estações representativas para o córrego Palmeira e demais córregos representados pela estação de Lagoa Santa.

| Ano Hidrológico | Pluviometria Anual |                 | Período Seco*    |                 | Período Chuvoso** |                 |
|-----------------|--------------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
|                 | Córrego Palmeira   | Demais Córregos | Córrego Palmeira | Demais Córregos | Córrego Palmeira  | Demais Córregos |
| 2017/18         | 1268,7             | 1160,4          | 104,3            | 66,8            | 1164,4            | 1093,6          |
| 2018/19         | 1119,9             | 1142,0          | 98,5             | 142,1           | 1021,4            | 999,9           |
| 2019/20         | 1384,2             | 1211,4          | 88,0             | 107,6           | 1296,2            | 1103,8          |
| 2020/21         | 1124,4             | 1135,0          | 142,4            | 142,4           | 982,0             | 992,6           |

\*Período Seco (abril a setembro) \*\*Período Chuvoso (outubro a março)

Os eventos pluviométricos ocorridos no período chuvoso de 2019/20 são evidenciados em todos os hidrogramas com o aumento significativo de vazão nos cursos d'água. O nível de água mais elevado refletiu no ano seguinte (2020/21) em todos os cursos d'água, com exceção do córrego Samambaia.

Dessa forma, apesar dos eventos pluviométricos do ano 2020/21 serem menores que a média histórica, o nível regional do sistema aquífero se manteve mais elevado, fato corroborado com o aumento do escoamento de base nos hidrogramas a partir deste ano, e a recuperação do nível de base das lagoas da área. Com relação ao córrego Samambaia, é importante ressaltar que seu nível d'água não foi elevado como os demais por apresentar um barramento a montante do ponto de monitoramento, com controle de vazão após o barramento. Portanto, desconsiderando esse ponto na análise, supõe-se que durante esse período (2019 a 2021) houve uma elevação regional do nível do aquífero.

Ao averiguar os eventos pluviométricos isolados e as variações de vazão, percebe-se que eles ocorrem quase que de maneira simultânea, o que corrobora com os resultados obtidos por De Paula e Velásquez (2020) que determinaram tempos de respostas destes cursos d'água de um a três dias após os eventos pluviométricos. Uma avaliação do comportamento dos hidrogramas em uma série de quatro anos de monitoramento possibilitou observar o

comportamento similar entre as bacias majoritariamente pelíticas (córrego Flor e Jaque), com as bacias carbonáticas (Palmeira- Jaguará, Escrivânia-Gordura e Samambaia), e pode-se concluir que as bacias Flor e Jaque, antes classificadas como bacias pelíticas, são mais bem classificadas como mistas, já que também são influenciadas pelo sistema carbonático.

Ao avaliar a descarga das bacias, observa-se que a bacia Palmeira-Jaguara reage instantaneamente aos eventos pluviométricos e desaguam com grande velocidade, e revela ser um sistema com elevado grau de carstificação. O maior desenvolvimento do carste desta região pode ser confirmado pela existência de uma centena de cavidades observadas nestas bacias. Estudos recentes desenvolvidos por Dantas, Velásquez e De Paula (2023) delimitou parte desta bacia como uma das regiões de maior carstificação da área de estudo.

Ainda sobre as descargas, quando avaliadas em escala anual, percebe-se que os córregos Gordura, Samambaia e Jaque, no ano hidrológico de 2019/20 para 2020/21, ou seja, após o período chuvoso do ano 2019/20, apresentaram um período de recessão regional observada em 2020/21 que se estendeu de 3 a 5 meses. Durante esse período prolongado de lenta recessão, observado após um período de elevação do sistema aquífero, os paleocondutos das porções superiores foram reativados com as chuvas de 2019/20, e foram esvaziados ao longo dos meses subsequentes de maneira mais lenta. O fato da bacia do córrego Jaque apresentar o mesmo comportamento é mais um indicativo deste possuir contribuições carbonáticas subterrâneas.

Após a avaliação das recargas e descargas das bacias, foi analisado separadamente cada hidrograma utilizando gráficos de *boxplot* para avaliar a variabilidade das vazões ao longo dos 48 meses (Figura 2.7) em conjunto com os hidrogramas da Figura 2.6.

O córrego Jaguará exibiu a maior variabilidade de vazão. A média e mediana apresentou grande variabilidade e uma grande quantidade de *outliers*. Como dito, essa bacia está na região mais carstificada e apresenta rápidos eventos de recarga e descarga. Portanto, pode-se relacionar essa alta variabilidade ao recebimento de águas sazonais de eventos pluviométricos ocorridos nos maciços distantes desta bacia. A produtividade média obtida para os quatro ciclos de monitoramento foi de  $0,0079 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ .

A bacia Escrivânia-Gordura, monitorada pelas vazões do córrego Gordura, provavelmente recebe contribuições alóctones, conforme descrito nos trabalhos de De Paula (2019). Essas afirmações podem ser relacionadas à produtividade nominal destas bacias, uma vez que a vazão da bacia Escrivânia-Gordura é menor que a do córrego Jaguará, e não apresenta uma variação sazonal marcante como o Jaguará. Pelo contrário, como mostrado na Figura 2.7, o córrego Gordura apresenta uma descarga com distribuição homogênea, porém, a produtividade média da bacia Escrivânia-Gordura é muito alta, de  $0,00915 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ .



A bacia Escrivânia-Gordura não apresenta nem área nem densidade de maciços superior à do Palmeira-Jaguara. Portanto, a alta produtividade específica pode ser justificada pela existência de fluxos subterrâneos provenientes de fora da bacia. Teodoro (2020), em seu trabalho sobre traçadores corantes, identificou que dois terços da vazão desta bacia é proveniente de fontes internas, e o restante da sua descarga tem origem ainda desconhecida.

O córrego Palmeira, por sua vez, possui fluxo de água de norte a sul, e é interpretado como um sistema mais antigo devido ao sentido de fluxo incomum para área, paralelo à formação dos cursos d'água estaduais e federais existentes no carste do Bambuí em Minas Gerais (sul para norte). A produtividade relativamente baixa desta bacia ( $0,0062 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ ) indica que ela é drenada para outro sistema, pois, apesar de ser um sistema cárstico, ele não produz como as demais bacias carbonáticas. As hipóteses apresentadas para essa bacia são sustentadas pelo fato de que a drenagem termina em um sumidouro no extremo sul da bacia, e posteriormente é direcionada para o meio subterrâneo para leste, no sentido da ressurgência existente na bacia do Jaguara, e dessa forma constitui a bacia hidrogeológica Palmeira-Jaguara. Ensaio de traçadores corantes realizados por Auler (1994) e Teodoro (2020), entre outros autores, comprovaram essas conexões.

O córrego Flor apresenta uma baixa produtividade ( $0,0061 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ ). Este fato e a presença de cobertura argilosa da Formação Serra de Santa Helena inicialmente sugerem uma origem pelítica para a bacia. Contudo, as respostas semelhantes às bacias carbonáticas nos hidrogramas e a velocidade de resposta a eventos pluviométricos levantados em trabalhos de De Paula e Velásquez (2019), não são características de bacia tipicamente pelítica. Portanto, é provável que a bacia apresente contribuições carbonáticas de um sistema endocárstico mais evoluído.

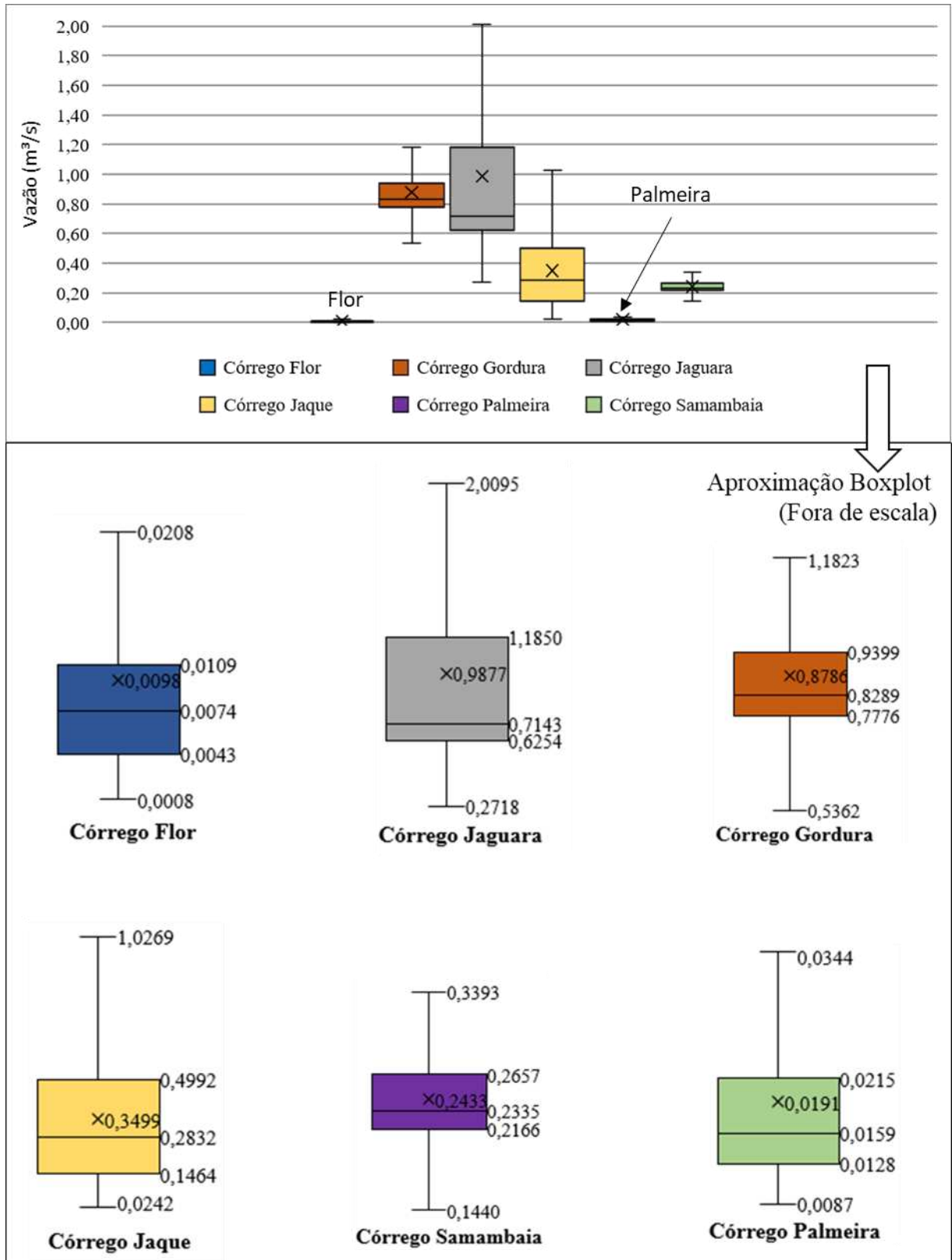


Figura 2.7 – Boxplot das vazões monitoradas com aproximação fora de escala para cada córrego.

É possível notar no córrego Samambaia uma boa similaridade entre essa bacia e as bacias do Palmeira-Jaguara e Escrivânia-Gordura. A localização geográfica da bacia do Samambaia, circundada por outras bacias e com o seu exultório terminando em um sumidouro,

a classifica como cárstica. A sua produtividade de  $0,0051 \text{ m}^3/\text{s km}^2$  é menor que a do Escrivânia-Gordura e Palmeira-Jaguara, o que indica um processo menos evoluído de desenvolvimento cárstico, ou uma menor área de captação.

Quando se compara as Figuras 2.6 e 2.7 para o córrego Jaque e Samambaia, observa-se grandes semelhanças dos hidrogramas, na variabilidade dos dados do *boxplot*, assim como na produtividade calculada, sendo que a bacia do Jaque possui produtividade de  $0,0058 \text{ m}^3/\text{s km}^2$ , e é um indicador de uma bacia mista.

## 7 CONCLUSÕES

Os dados de monitoramento por quatro ciclos hidrológicos possibilitaram a construção de curvas chaves robustas que tiveram seus dados de monitoramento e sua construção validados. A periodicidade do monitoramento na construção de curvas-chave evidenciou a importância de um monitoramento prolongado para produção e validação de curvas-chave. É importante destacar que a validade da curva está condicionada à não modificação da seção de monitoramento, assim como à obtenção de um valor  $R^2$  alto, sendo aqui sugerido valores superiores a 0,8.

Uma importante contribuição regional e para as comunidades existentes na área de estudo foi a variabilidade de carga hidráulica do aquífero, que registrou elevações após um período de maior pluviosidade, e manteve esse nível elevado até o ano hidrológico seguinte. A interpretação dos períodos de recessão dos hidrogramas sugere que houve a reativação de dutos superiores que foram descarregando ao longo de meses nas bacias do Escrivânia-Gordura, Jaque e Samambaia. Essas constatações ilustram um sistema cárstico complexo.

Em se tratando do sistema de recarga, foram constatadas evidências da provável ocorrência de recarga alóctone em pelo menos duas grandes bacias cársticas, devido à alta produtividade apresentada por esses sistemas quando comparados com os demais. Essas contribuições externas à área de estudo, área essa que circunda a APA Carste de Lagoa Santa, sugerem que a delimitação atual da área de proteção ambiental é insuficiente para abranger o seu sistema hidrogeológico real.

A similaridade dos hidrogramas das bacias estudadas durante os quatro ciclos hidrológicos revela que as bacias hidrográficas sobre as rochas pelíticas (córregos Jaque e Flor) são mais bem classificadas como bacias mistas. A bacia de Jaque, além da similaridade apresentada nos hidrograma, possui produtividade similar às bacias carbonáticas.

Recomenda-se um estudo mais aprofundado de recarga para região com o objetivo de setorizar as recargas por bacias, e setorizar as principais feições cársticas para definir a sua importância na comunicação entre o sistema superficial e subterrâneo, além da evolução de estudos integrando a zona saturada e vadosa de modo a avaliar o nível d'água no decorrer de anos hidrológicos.

## 8 REFERÊNCIAS

ALKMIM, F. F.; NEVES, B. B. B.; ALVES, J. A. C. Arcabouço Tectônico do Cráton do São Francisco—Uma Revisão. O Cráton do São Francisco. **II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, Salvador, Bahia**. 1993.

ALMEIDA J.C.D.; HERNANDEZ, F.B.T.; FRANCO, R.A.M.; ZACOLER J. L. Medição de velocidade e vazão em cursos d'água: molinete hidrométrico versus método do flutuador. Universidade Estadual de São Paulo, Unesp. **Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos**. 2010.

AULER, A.S. **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil**. Msc Thesis, Department Of Geography And Geology, Western Kentucky University, Bowling Green,.110 f. 1994.

BARBOSA, G.V. Notícia sobre o karst na mata de Pains. **Boletim Mineiro de Geografia**, Belo Horizonte, n. 2 e 3, 3-21. 1961.

BATISTA, R.C.B. **Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 127 p. 2009.

BERBERT-BORN, M.L.C. **Geoquímica dos Sedimentos Superficiais da Região Cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG), e os indícios de Interferências Antrópicas**. DEGEO/UFOP. Dissertação de Mestrado. 1998.

CARNEIRO, F.A. **Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 338 p. 2013.

CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas**. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>. Acesso em: 01 mai. 2023.

DE PAULA, R.S. **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste Lagoa Santa, MG**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 279p. 2019.

DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, 33(2), 119-133. 2019.

DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Method to complete flow rate data in automatic fluviometric stations in the karst system of Lagoa Santa area, MG, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**. 2020.

DELPOMDOR, F.R.; ILAMBWETSI, A.M.; CAXITO, F.A.; PEDROSA-SOARES, A.C. New interpretation of the basal Bambuí Group, Sete Lagoas High (Minas Gerais, E Brazil) by sedimentological studies and regional implications for the aftermath of the Marinoan glaciation: Correlations across Brazil and Central Africa. **Geologica Belgica**. 2020.

GALVÃO P.; HIRATA R.; CONICELLI B. Estimating groundwater recharge using GIS based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 77(10): 398. 2018.

KARFUNKEL J.; HOPPE, A. Late Proterozoic glaciation in central-eastern Brazil: synthesis and model. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. 65:1-21. 1988.

KOHLER, H.C. A Evolução Morfogenética da Lagoa Santa - MG. **Anais 30º Congresso Brasileiro de Geologia**, Recife, 1, 147-153. 1978.

KÖPPEN, W.G., Geiger R. **Klimate der Erde**. Gotha Verlagcondicionadas, Justus Perthes. 1928.

MARTINS-NETO M.A.; PEDROSA-SOARES A.C.; LIMA S.A.A. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basis from Late Paleoproterozóico to Late Neoproterozóico in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. **Sedimentary Geology**, 141-142: 343-370. 2001.

PESSOA, P.F.P. **Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG**. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 375 p. 2005.

PILÓ, L.B. **A morfologia cárstica do baixo curso do rio Peruaçu, Januária-Itacarambi, MG**. Instituto de Geociências da UFMG, Belo Horizonte. Monografia de Graduação, 80 p. 1989.

PILÓ, L.B. Geomorfologia Cárstica - Revisão de Literatura. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 1, 1, 88-102. 2000.

RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FILHO, A.D.; PADILHA, AV.; CÓRDOBA, C.V. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – **Relatório final CPRM**, 2ª ed, escala 1:50.000. 2003.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M. V. B; BUBA, H.; KISHI R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria Aplicada**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, PR. LACTEC. ISBN 85-88519-01-1. 2001.

SILVA, J.C.S. **Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG**. Escola de Engenharia,

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), 303 p. 2003.

TEIXEIRA, G.M.; PENA, M.A.C.; SILVA, P.H.P. **Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Trabalho de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2020.

TEODORO M.I.P.; VELÁSQUEZ L.N.M.; FLEMING P.M.; DE PAULA R.S.; SOUZA R.T.; DOI B.B. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de Traçadores Corantes, na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, 33(4):392-406. 2019.

TRICART, J. O Karst das vizinhanças setentrionais de Belo Horizonte (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, 4, 3-20. 1956.

UHLEIN A.; TROMPETTE R.R.; ALVARENGA C.J.S. Neoproterozoic glacial and gravitational sedimentation on a continental rifted margin: The Jequitai-macaúbas sequence. Minas Gerais, Brazil. **J South Am. Earth Sci**, 12: 435-451. 1999.

VELÁSQUEZ, L.N.M.; ANDRADE, I.B.; RIBEIRO, C.G.; AMARAL, D.G.P.; VIEIRA, L.C.M.; CARDOSO, F.A.; PAULA, R.S.; SILVA, P.H.P.; SOUZA, R.T.; ALMEIDA, S.B.S. **Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Relatório parcial, PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317 / Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco. 2018.

VIANA, H.S.; KOHLER, H.C.; TAVARES, V.P. (Org.). **APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico.** Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 301p. 1998.

WHITE, W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions. **Engineering Geology**, v. 65, p. 85-105. 2002.

### **3 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE RECARGA APLICADA AOS AQUÍFEROS FISSURAIS E CÁRSTICOS DA REGIÃO DA APA CARSTE DE LAGOAS SANTA, MG**

#### **RESUMO**

A APA Carste de Lagoa Santa é local que armazena importantes aquíferos cárstico e cárstico-fissurais das rochas carbonáticas da bacia do Bambuí, responsáveis pelo abastecimento público e privado da região. Essa região se localiza no Estado de Minas Gerais, Brasil, e, apesar de sua relevância ambiental, é uma área marcada pelo aumento de impactos ambientais antrópicos. Portanto, estudos envolvendo a análise da dinâmica entre a água superficial e subterrânea são cruciais. A APA é conhecida mundialmente por ter sido o local onde o fóssil humano mais antigo nas Américas foi encontrado. Para além de suas riquezas arqueológicas, contém ainda grande riqueza espeleológica, faunística e florística, além de sua paisagem cárstica exuberante. A fim de investigar o aporte de água anual para os aquíferos, este estudo objetivou estimar a taxa de recarga anual nos anos hidrológicos de 2017 a 2021 usando três métodos: deslocamento da curva de recessão de Rorabaugh (1964), o método baseado no parâmetro de filtro recursivo digital de Lyne e Hollick (1979) e o método baseado na variação de nível d'água em poços tubulares, de Healy e Cook (2002). Os três métodos apresentaram uma taxa média anual do período total analisado de 13%, 9% e 9%, respectivamente, e indicaram que, no geral, as taxas de recarga da área de estudo são baixas, e apresentam valores maiores nas bacias cársticas em comparação com as bacias localizadas nas zonas pelíticas. De maneira geral, os métodos retornaram valores coerentes entre si e entre resultados de estudos anteriores na área. O método automatizado de deslocamento de curva de recessão, com relação ao método automatizado de filtro digital recursivo, se mostrou mais aderente por considerar medidas diárias de vazão. O método VNA, apesar de resultar em medidas de recarga mais pontuais, foi muito útil para a análise de recarga de forma setorizada, e permitiu analisar as taxas de recarga de cada unidade aquífera. A aplicação de mais de um método de recarga foi eficiente no sentido de se obter dados mais confiáveis através da comparação entre os resultados obtidos. Apesar da semelhança dos valores obtidos nos métodos, eles provavelmente estão subestimados devido às altas taxas de bombeamento das águas subterrâneas. Além disso, recomenda-se aprofundar a correlação entre litotipo, geomorfologia cárstica e seus processos de dissolução para melhorar a compreensão dos processos de recarga.

Palavras-chave: recarga; APA Carste de Lagoa Santa; Curva de recessão; filtro digital recursivo; variação do nível d'água.

## ABSTRACT

The Lagoa Santa Karst Environmental Protection is a region with important aquifers for public and private water supply. Located in the state of Minas Gerais, Brazil, despite its environmental relevance, the area is characterized by increased anthropic environmental impacts. The EPA Karst is known worldwide as the place where the oldest human fossil in the Americas was found. Beyond its archeological richness is speleological, faunistic, and floristic richness across this remarkable karstic landscape. Regarding the relationship between surface water and groundwater, in order to investigate the annual input of water into the aquifers, this study aimed to estimate the annual recharge rate in the hydrological years 2019 to 2021 using three methods: the recession curve displacement method of Rorabaugh (1964), the recursive digital filter method by Lyne and Hollick (1979), and the method based on water-table fluctuation in tubular wells proposed by Healy and Cook (2002). The mean annual rate, encompassing the entire period sampled, found with the three methods was 13%, 9%, and 9%, respectively, which indicates that recharge rates within the study area are low and that higher values are observed within karst basins in comparison with basins located in pelitic zones. Overall, the methods yielded coherent values among each other and were compared with previous studies in the area. In relation to the automatized recursive digital filter method, the automatized recession curve displacement method was more adherent because it considers daily streamflow measurements. The WTF method was handy for the sectorized recharge analysis and enabled an evaluation of recharge rates in each aquifer unit. Despite the similarity of the values obtained in the methods, they are likely underestimated due to the high pumping rates of groundwater. Furthermore, it is recommended to deepen the correlation between lithotype, karst geomorphology, and its dissolution processes to improve the understanding of recharge processes.

Keywords: Recharge; Lagoa Santa Karst EPA; recession curve; recursive digital filter; water-table fluctuation.



## 1 INTRODUÇÃO

A Área de Preservação Ambiental (APA) de Lagoa Santa está localizada a cerca de 55 km a norte de Belo Horizonte, capital de Minas Gerais (Brasil). Trata-se de um ambiente cárstico reconhecido internacionalmente pela diversidade de flora, fauna e por sua riqueza espeleológica. A região já foi palco de grandes descobertas significativas no contexto científico nacional e internacional, tal qual o crânio humano mais antigo da América do Sul, encontrado pelo naturalista Peter Lund no século XIX na gruta Lapa Vermelha, Pedro Leopoldo.

Vários estudos foram desenvolvidos envolvendo caracterização hidrogeológica, geológica e geomorfológica da região. Os estudos mais relevantes datam da década de 1990, como o trabalho de Kohler (1978) sobre a evolução da geomorfologia de Lagoa Santa, e Silva *et al.* (1987) sobre a dinâmica dos estudos de recursos hídricos. Auler (1994) definiu domínios hidrogeológicos relevantes e rotas de fluxo, e Berbert-Born (1998) fez descobertas relevantes sobre a geoquímica de sedimentos superficiais. Pessoa (2005) é também uma referência essencial para a caracterização hidrogeológica do que definiu como aquíferos cársticos cobertos.

Vários foram os projetos desenvolvidos na região, com destaque para os projetos da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), como o Projeto APA Carste Lagoa Santa de Viana *et al.* (1998) e o Projeto Vida de Ribeiro *et al.* (2003).

O Projeto PAN San Francisco Caves, de Velásquez *et al.* (2018), também resultou em muitos estudos nesta área, incluindo a pesquisa de Ribeiro *et al.* (2016), Vieira (2015), Lima, Fonseca e Matinaga (2016), Andrade e Amorim (2018), Magalhães e Silva (2018); Vieira (2018), Amaral (2018), Cardoso (2019), Ribeiro (2020), De Paula (2019), De Souza (2020), Silva (2022) e Dantas (2023).

Apesar de sua relevância ambiental, é uma região marcada pela mineração de calcário, pela agropecuária e pela indústria, resultando no aumento crescente da urbanização, responsável pela maior impermeabilização do solo e aumento da poluição e contaminação do solo e da água. Além disso, o seu sistema hidrogeológico cárstico é intrinsecamente mais vulnerável à poluição devido à forma de recarga pontual através de sumidouros e fraturas (DE PAULA, 2019).

Considerando o que foi exposto, é importante se conhecer a dinâmica entre a água superficial e subterrânea a partir do aprofundamento nos conhecimentos dessas regiões de recarga e na determinação da parcela de água que é, de fato, recarregada para o aquífero.

Para isso, foi realizado o monitoramento de quatro anos hidrológicos, a partir de 2017, das principais bacias da região, sendo estas a bacia do Flor, Gordura-Escrivânia, Palmeira-Jaguara, Palmeira, Samambaia e Jaque. Para possibilitar o cálculo direto da recarga por meio da determinação do escoamento de base dos cursos d'água citados, as curvas chave desses córregos foram atualizadas conforme as medições de vazão e nível d'água para o posterior cálculo de recarga aquífera.

Foram aplicados neste trabalho três métodos já consagrados na literatura para a estimativa de recarga aquífera e comparados os resultados. Dentre eles, foi utilizado o método de Rorabaugh (1964) baseado no deslocamento de curvas de recessão para se estimar a recarga a partir do monitoramento diário de vazão dos principais córregos da região. Esse método foi automatizado por Rutledge e Daniel (1994) e disponibilizado no programa RORA, incluído no pacote de *softwares* da *GW Toolbox* (Barlow *et al.*, 2015), onde, além de contar com o programa RORA para quantificação de recarga, possui diversos métodos automáticos para análises de hidrogramas.

O método automatizado baseado no deslocamento da curva de recessão é amplamente utilizado e já foi aplicado por Paula (2019) na área de estudo, e as análises atuais puderam ser comparadas com aqueles obtidos anteriormente. Pode-se citar outras aplicações do método em outros sistemas, como a estimativa de recarga de Albuquerque e Chaves (2011) na bacia do rio das Fêmeas, oeste da Bahia; na bacia do Ribeirão da Onça, São Paulo (LUCAS e WENDLAND, 2011), além de diversos outros estudos de caso em escala regional, como a estimativa de recarga a partir de 157 estações de medição de vazão em Piemont, Valley e Ridge e Blue Ridge, EUA (RUTLEDG e MESKO, 1996), e estudos que visaram a comparação deste método com outros, por Delin *et al.* (2007), Risser, Gburek e Folmar (2005), Ruhl, Kanivetsky e Shmagin (2002), disponíveis para consulta pela página eletrônica do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2017).

Além disso, foi aplicado o método de filtro digital recursivo criado por Lyne e Hollick (1979), implementado por Nathan e McMahon (1990) e adaptado e automatizado por Smakhtin (2001) para aplicação automática em bacias com monitoramento mensal de vazão.

Como neste estudo as leituras das vazões dos córregos estudados foram diárias, o valor mensal considerado foi o valor médio das vazões diárias. A justificativa para o emprego nesse método adaptado é o fato de ser um método automatizado e amplamente utilizado em estudos que possuem monitoramento fluvial com periodicidade mensal, e não diária, e a comparação deste método com o método de monitoramento diário de Rorabaugh (1964) permitiu avaliar a sua acurácia. Além disso, a utilização da técnica dos filtros digitais recursivos é comumente

utilizada em trabalhos de cunho ambiental, e pode-se citar o trabalho de Bortolin *et al.* (2018) que utilizou parâmetro de filtro para estimar a recarga em sub-bacias hidrográficas no Rio Grande do Sul; além de Betancur (2019) que realizou uma comparação entre quatro diferentes parâmetros de filtro para estimar a contribuição do fluxo de base em regiões com alto índice pluviométrico na bacia do rio Atrato, Colômbia.

Por fim, empregou-se o procedimento de Healy e Cook (2002) para o cálculo da recarga de água subterrânea a partir das variações de nível d'água de poços tubulares inativos. Técnica amplamente utilizada em outros estudos, ela tem a vantagem de quantificar a recarga de forma direta, sem utilizar de dados de descarga, o que permite sua estimativa em bacias onde não há dados de monitoramento fluvial, além de avaliar apenas a água que realmente chega no aquífero, descartando o escoamento subsuperficial. Como exemplo da aplicação desse método, pode-se citar o trabalho de Soares (2012) que utilizou o método em aquíferos da bacia cárstica do rio Riachão, na região do Norte de Minas; trabalho de Da Cunha, Mourão e Cota (2016) no aquífero Urucuia, Bahia, e o trabalho de Varni (2013) na região de Pampas na Argentina. As aplicações do método são vastas, tanto em âmbito nacional quanto internacional.

Além disso, valores de excedente hídrico obtidos por meio do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) foram analisados e comparados com os valores de escoamento superficial dos hidrogramas das bacias a fim de se quantificar o impacto por bombeamento na área estudada.

Os resultados individuais dos métodos foram obtidos e correlacionados entre si para uma análise embasada da recarga subterrânea na região de estudo. Além do mais, foram observadas as relações de produtividade, do impacto do bombeamento nos índices de recarga, e nas relações de carstificação e armazenamento da área. Este estudo tem o objetivo ainda de ser uma ferramenta que poderá permitir um melhor gerenciamento da água superficial e subterrânea dessa importante região do Brasil, além de possibilitar uma análise crítica dos métodos de recarga descritos que podem auxiliar as aplicações futuras em ambientes similares.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO FÍSICA

A região de estudo possui uma área de 504 km<sup>2</sup> e engloba parcial ou totalmente oito municípios do Estado de Minas Gerais, e é limitada a leste e nordeste pelo Rio das Velhas, e a sudoeste pelo ribeirão da Mata (Figura 3.1).

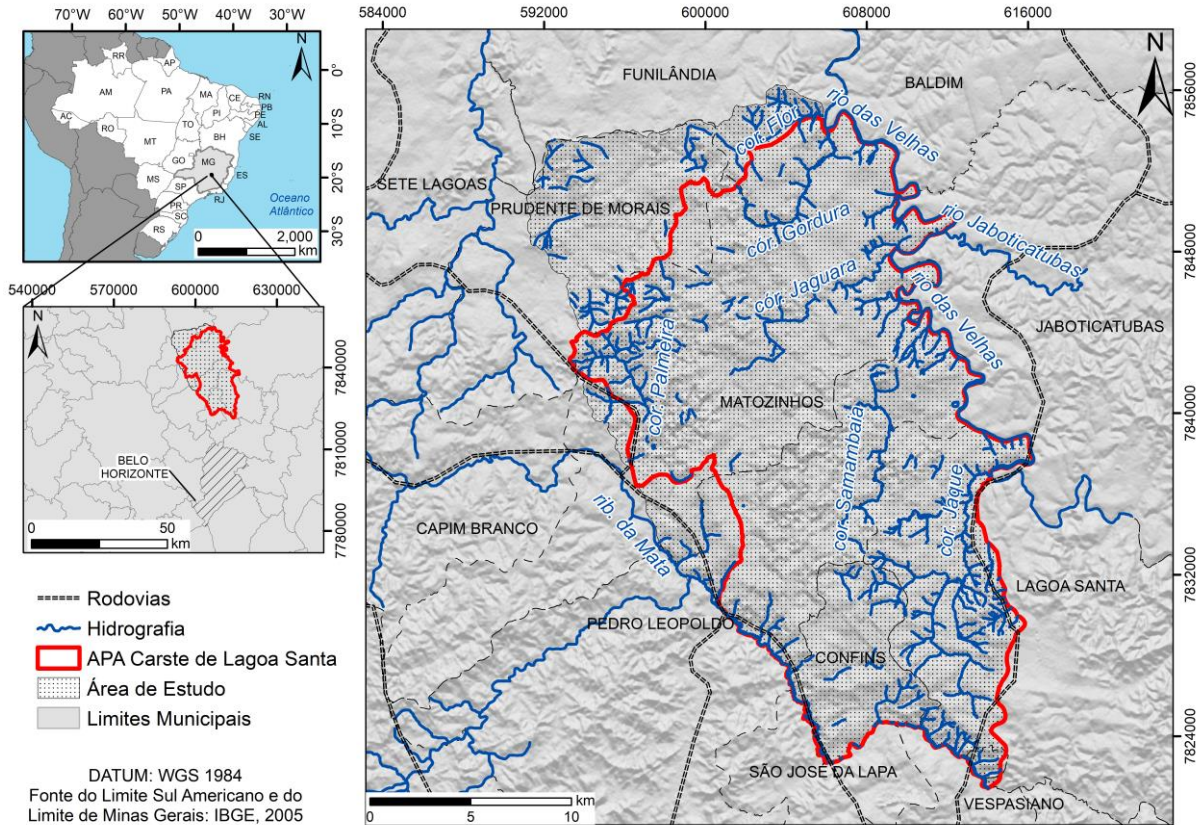


Figura 3.1 - Mapa de Localização da área de estudo com destaque para região da APA Carste de Lagoa Santa e da área de estudo. Há ainda indicação dos municípios dentro e nos arredores da área de estudo, e destaque para os principais cursos d'água da região.

### 2.1 Hidrografia

A área de estudo está inserida no contexto da Bacia hidrográfica federal do rio São Francisco e contida inteiramente na bacia estadual do Rio das Velhas. A nível local, a área é formada por onze sub-bacias hidrográficas: Flor, Escrivânia-Gordura, Palmeira-Jaguara, Palmeira, Margem Velhas, Samambaia, Bom Jardim, Margem Ribeirão da Mata, Confins, Retiro e Jaque. Uma característica marcante da área de estudo é a pouca densidade de drenagens superficiais (Figura 3.1) e a predominância de uma rede de drenagem subterrânea. Todas as bacias da área apresentam descarga direta para o rio das Velhas, com exceção das bacias do Samambaia, Palmeira e Retiro, cuja descarga é indireta e remete ao evoluído caráter cárstico da região (DE PAULA, 2019).

As principais bacias hidrográficas da região são Flor, Palmeira, Palmeira-Jaguara, Jaque, Samambaia e Escrivânia-Gordura. A bacia do Flor é do tipo mista (pelítica e carbonática). Possui vazões médias de 0,01 m<sup>3</sup>/s, área de 16 km<sup>2</sup> e altitude de 632 m no ponto de monitoramento. A bacia, em geral, apresenta vazões baixas. Esse córrego é afetado pela retirada de água, secando na estação seca (DE PAULA, 2019).

A bacia do Palmeira é uma bacia carbonática altamente carstificada. Possui uma área de 31 km<sup>2</sup>, e a altitude no ponto de monitoramento é de 733 m. A vazão média monitorada é baixa, de 0,02 m<sup>3</sup>/s. O córrego Palmeira imerge em um sumidouro cárstico e ressurge no córrego Jaguara. As conexões existentes formam um único compartimento, denominado por Auler (1994) de bacia Palmeira-Jaguara. Essa bacia, por sua vez, também é uma bacia cárstica com vazão média de 0,98 m<sup>3</sup>/s, área de abrangência de 156 km<sup>2</sup> e altitude no ponto monitorado de 636 m.

A bacia de Samambaia tem vazões médias de 0,24 m<sup>3</sup>/s e uma área de 48 km<sup>2</sup>. A altitude no ponto de monitoramento é de 691 m, e trata-se bacia carbonática. A bacia do Jaque é mista (pelítica e carbonática) e apresenta vazão média de 0,34 m<sup>3</sup>/s e área de 59 km<sup>2</sup>. A altitude no ponto de medição é de 663 m. Assim como Samambaia, possui vazões intermediárias. Por fim, a bacia Escrivânia-Gordura é predominantemente carbonática, com alta vazão média de 0,88 m<sup>3</sup>/s. Sua área de cobertura é de 96 km<sup>2</sup>, e a altitude do ponto de medição é de 597 m. A bacia da Escrivânia possui uma única nascente, que flui por 500 metros até imergir em um sumidouro e emergir na bacia do Gordura, formando assim um único compartimento denominado Escrivânia-Gordura (VELÁSQUEZ *et al.*, 2018).

## 2.2 Clima

O clima da APA Carste, assim como toda a região tropical brasileira, está no domínio do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (Viana *et al.*, 1998). Ao levar em conta a relação entre precipitação e temperatura, a partir da classificação de Köppen-Geiger (1900), a APA está inserida no clima Tropical (Aw), com a existência de duas estações definidas: inverno seco, de abril a setembro, e verão chuvoso de outubro a março (Viana *et al.*, 1998). Considerando a análise da temperatura média histórica realizada por De Paula (2019), a temperatura máxima média anual no período de 1961 a 2016 foi de 28,5 °C, enquanto a mínima foi de 15,9 °C. Já a precipitação histórica média anual (1980 a 2021) é de 1173 mm, de acordo com o mapa de Thiessen realizado (Figura 3.2).



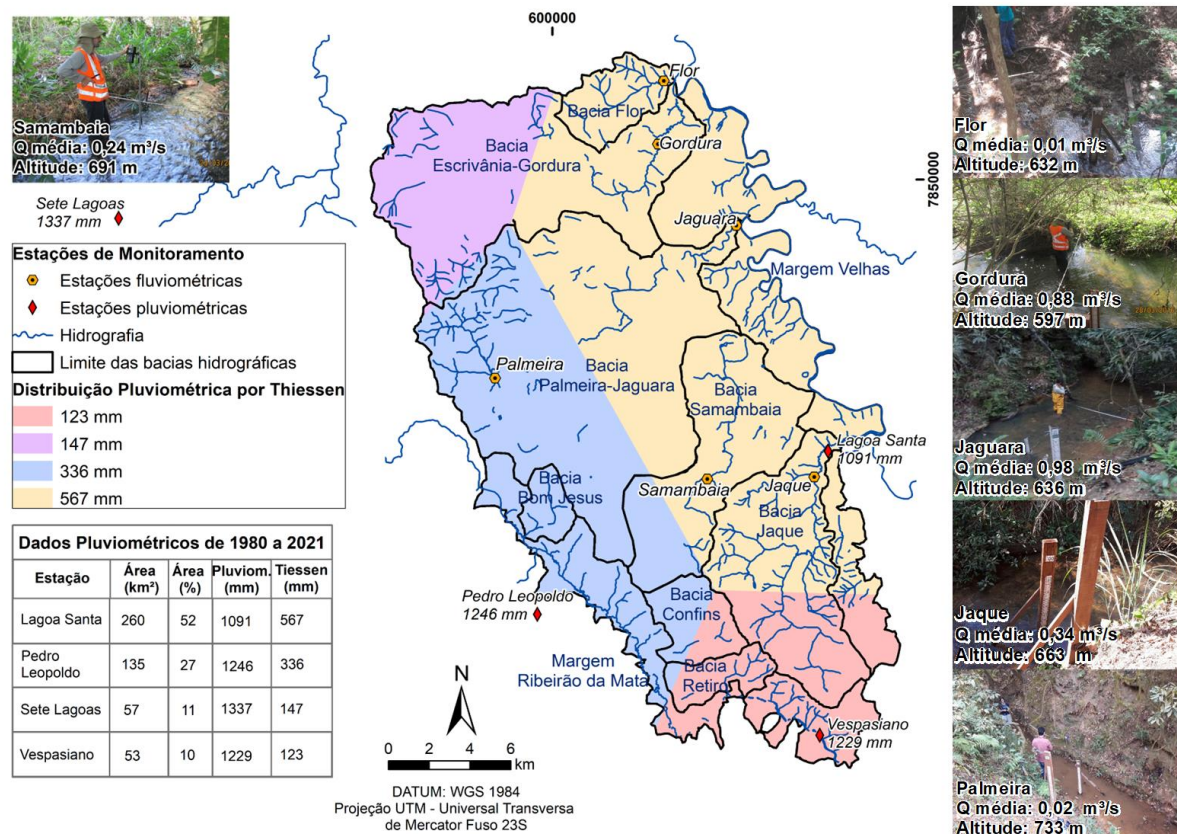


Figura 3.2 – Mapa de Thiessen da área de estudo considerando as estações pluviométricas de Sete Lagoas, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Vespasiano. Foram indicados também os pontos de monitoramento fluviométricos e os poços tubulares monitorados.

### 3 GEOLOGIA

A quase totalidade das litologias da área estudada são constituídas de rochas clásticas e carbonáticas Neoproterozoicas pertencentes ao Grupo Bambuí, composto, da base para o topo, pelas unidades da Formação (Fm.) Sete Lagoas, Fm. Serra de Santa Helena, Fm. Lagoa do Jacaré, Fm. Serra da Saudade e pela Fm. Três Marias. A unidade basal da estratigráfica corresponde ao embasamento cristalino gnáissico-granítico-migmatítico do Complexo Belo Horizonte, presente de modo restrito na porção oeste da área. Segundo Pessoa (2005), o aprofundamento do embasamento ocorre de oeste para leste. Portanto, a espessura da unidade carbonática varia de dezenas a centenas de metros à medida que se aproxima da porção leste da área. Segundo Galvão (2015), a espessura da bacia do Bambuí a leste pode atingir até 400 metros de espessura próximo ao rio das Velhas.

As unidades aflorantes do Grupo Bambuí são compostas pelas Formações Sete Lagoas e Serra de Santa Helena e abrangem a maior parte da área (Figura 3.3). A Formação Sete Lagoas, por sua vez, é dividida em dois membros: Membro Pedro Leopoldo e Membro Lagoa

Santa. Enquanto o Membro Pedro Leopoldo corresponde a um metacalcário de granulação fina impuro, composto, além da calcita, por sericita e quartzo, o Membro Lagoa Santa, no topo, constitui um metacalcário composto por um teor acima de 90% de calcita. Porém, esse membro pode conter certas impurezas, como sulfetos, sericita e quartzo, especialmente próximo ao contato com a Formação Serra de Santa Helena (TEIXEIRA, PENA e SILVA, 2020). O Membro Lagoa Santa, devido ao seu alto teor de pureza, é a unidade com mais feições cársticas associadas.

A Formação Serra de Santa Helena, unidade de topo do Grupo Bambuí na área de estudo, aflora como um metapelito, geralmente muito intemperizado, composto por argilominerais e quartzo, sendo comum a presença de veios de quartzo paralelos ao acamamento. A rocha apresenta uma granulometria fina e uma foliação formada pelos planos dos minerais filossilicáticos.

No topo da estratigrafia estão as coberturas detrito-lateríticas, de granulometria variada e que formam concreções limonitizadas ou em forma de um solo laterítico contendo caulim. Além disso, a região é composta por coberturas aluvionares que margeiam os principais cursos d'água da área. Essas coberturas formam depósitos de granulometria variada contendo sedimentos de minerais como quartzo, além de fragmentos rochosos.

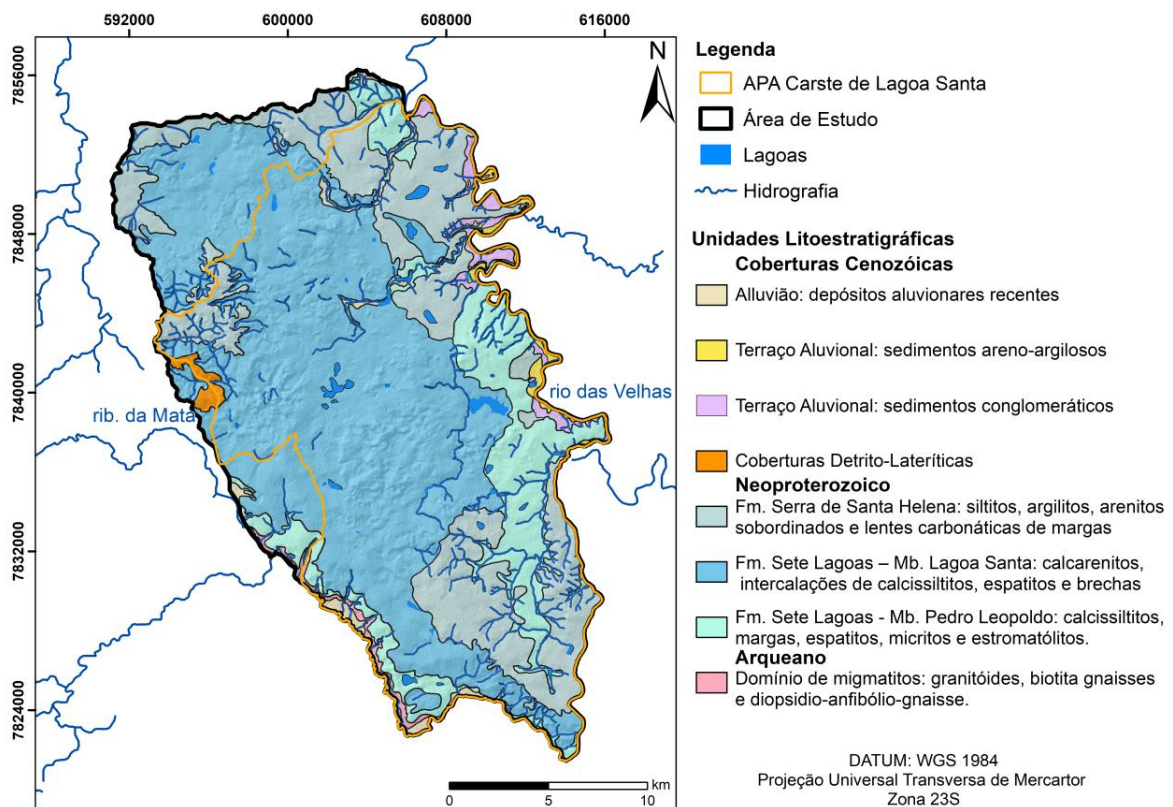


Figura 3.3 – Mapa geológico da região de estudo. Retirado de Ribeiro *et al.* (2003) e adaptado por trabalhos de Vieira (2015) e Ribeiro *et al.* (2016).

#### 4 HIDROGEOLOGIA

A hidrogeologia da área é caracterizada principalmente pela existência de aquíferos vinculados às rochas carbonáticas, que formam aquíferos cársticos com complexas redes de fluxo subterrâneas. Com base na geomorfologia cárstica bem desenvolvida, a maioria dos cursos d'água é drenada para condutos subterrâneos (RIBEIRO *et al.*, 2016). No entanto, existem aquíferos associados também às rochas do embasamento cristalino e às coberturas coluvionares. Ao considerar os aspectos geológicos, estruturais, litológicos, estratigráficos e morfológicos das rochas, de Paula (2019) discriminou quatro unidades hidroestratigráficas, correspondentes às unidades do embasamento Cristalino, de Sete Lagoas, da Serra de Santa Helena e das Coberturas.

A unidade do Cristalino está contida no domínio das rochas do Complexo Granito-gnáissico- migmatítico e trata-se de um aquífero fissural, em que as falhas e fraturas existentes transmitem e armazenam a água. O sentido de fluxo dessa unidade, segundo Andrade e Amorim (2018) é de oeste para leste. Mourão, Cruz e Gonçalves (2001) relatam que a recarga desta unidade está atribuída ao encaixe de cursos d'água em sistemas de fratura do embasamento, e também à infiltração de água através das coberturas coluvionares. Mais recentemente, Teixeira, Pena e Silva (2020) descreveram ainda que a região de contato entre o embasamento com as rochas da bacia do Bambuí também tem potencial de ser uma zona importante de recarga para o aquífero cárstico-fissural, por ser uma região de alto topográfico e uma zona de contato litológico.

A unidade Serra de Santa Helena é correspondente a um aquífero que transmite água para o aquífero carbonático inferior por drenança, através dos planos de descontinuidades (DE PAULA, 2019). Galvão, Hirata e Conicelli (2018) nos estudos dos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena em Sete Lagoas mostrou que as porções com maior potencial para recarregar o aquífero são as regiões com cobertura de solos mais arenosos, regiões com declives < 2%, e entre 2-7%, e regiões com cobertura florestal. Essa unidade, apesar de não ser muito produtiva na área de estudo, tem a função de recarregar os aquíferos carbonáticos sotopostos.

A unidade hidrogeológica de Cobertura é formada pelos depósitos detrítico-lateríticos e pelos depósitos aluvionares, e compõem o aquífero suspenso, de pouca expressividade e espessura na área. Diferentemente das outras unidades, trata-se de um aquífero com porosidade primária, e funciona também como uma zona de recarga dos aquíferos inferiores.

A unidade aquífera mais importante da área é a de Sete Lagoas, e também é a unidade palco para a maior parte das investigações hidrogeológicas da área. A circulação da água nessa



unidade está condicionada principalmente à existência de zonas de dissolução que formam condutos e cavernas, e também à existência de descontinuidades das rochas, como falhas e as fraturas. Viana *et al.* (1998) descreve este aquífero como produtivo e também vulnerável.

Em relação às suas direções preferenciais de fluxo, Ribeiro *et al.* (2019) e Teodoro (2020) indicam que o sentido principal de fluxo da região é de oeste para leste, e é influenciada principalmente pelas fraturas de alto ângulo.

As formas de recarga observadas na área são do tipo autogênicas, isto é, a água de recarga é proveniente do próprio sistema (WHITE, 2002). Teixeira, Pena e Silva (2020) destacam uma zona de recarga alogênica relevante, proveniente da surgência Bom Jardim na porção centro-oeste, cuja descarga forma um dos principais córregos da área de estudo, o córrego Jaguará. Ainda segundo esses autores, existe uma conectividade hidrogeológica expressiva da porção a oeste com a área de estudo, evidenciada pela similaridade entre as unidades hidrogeológicas consideradas por eles e por de Paula (2019), além da conectividade com o sentido de fluxo da água subterrânea.

Auler (1994) descreve ainda que a recarga dos aquíferos cársticos ocorre nos afloramentos calcários e nas estruturas de abatimento cárstico (depressões cársticas), e através das coberturas, principalmente nas regiões planas e planaltos cársticos. Pessoa (2005) também destacou que a porcentagem de recarga varia nos afloramentos calcários expostos pela mineração, onde a taxa de infiltração é alta.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho consistiu na aplicação de três métodos para a estimativa de recarga aquífera. Foram empregados dois métodos automáticos de cálculo da recarga a partir da separação de fluxo de base: método baseado deslocamento da curva de recessão de Rorabaugh (1964) e o outro método baseado no parâmetro de filtro recursivo digital de Lyne e Hollick (1979). Os métodos foram aplicados nas seis sub-bacias da região de estudo: bacias do Jaque, Flor, Escrivânia-Gordura, Palmeira, Palmeira-Jaguara e Samambaia (Figura 3.2).

Além disso, o balanço hidroclimatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) foi aplicado para obter a relação do fluxo de base e a evapotranspiração real e potencial. Enquanto a evapotranspiração potencial é a evapotranspiração máxima que ocorreria se o solo tivesse um suprimento de água suficiente, a evapotranspiração real está relacionada à disponibilidade de água no solo, e pode ser menor ou igual à evapotranspiração potencial. Para

a aplicação do balanço hidroclimatológico foram utilizados os dados pluviométricos das quatro estações pluviométricas representadas na Figura 3.2.

A representação numérica e espacial da precipitação da área foi determinada de acordo com o método proposto por Thiessen (1911), que considera a relação entre o valor da precipitação de cada estação e sua respectiva área de influência.

Os tópicos a seguir irão discutir melhor a descrição de cada método utilizado e o sistema de aquisição de dados.

## **5.1 Sistema de Monitoramento e de Aquisição dos Dados**

Foram utilizados os dados de vazão desses córregos dos anos hidrológicos de abril de 2017 a março de 2021, os quais foram obtidos a partir das curvas-chave atualizadas derivadas das medidas da lâmina d'água, a partir de transdutores de pressão (levelloggers e barologgers) instalados nas seis bacias (Figura 3.2). A atualização das curvas-chave de De Paula (2019) foi realizada a partir da medição manual das vazões e do nível d'água das réguas ocorrida no período entre o final de 2020 e início de 2021.

O terceiro método aplicado foi o da Variação do Nível d'água (VNA), desenvolvido por Healy e Cook (2002). Para tanto, utilizou-se como dado primário a variação o nível d'água de 13 poços tubulares inoperantes (Figura 3.2) monitorados automaticamente por meio de transdutores de pressão durante o período de abril de 2018 a março de 2021 com frequência horária.

Para o desenvolvimento do balanço hidroclimatológico, foram utilizados os dados pluviométricos de abril de 2017 a março de 2021 das seguintes estações pluviométricas: Vespasiano (1943009), Pedro Leopoldo (1944009), Ponte Raul Soares (1943049) e Sete Lagoas (1944052). Suas localizações espaciais são indicadas na Figura 3.2. Os dados das estações estão disponíveis nas plataformas digitais da Agência Nacional das Águas – ANA (2022) e do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2022).

## **5.2 Interpretações e Equações**

### **5.2.1 Método do Deslocamento da Curva de Recessão (RORABAUGH, 1964)**

O método de cálculo de recarga baseado no deslocamento da curva de recessão de Rorabaugh (1964) baseia-se no deslocamento ascendente da curva de recessão da descarga por conta do evento de recarga (ARNOLD e ALLEN, 1999).

Rorabaugh (1964) desenvolveu uma equação de séries infinitas que representa o fluxo de água do aquífero para o córrego, e, a partir do primeiro termo da série (Equação 1) é possível descrever o escoamento de base (Rutledge, 1998):

$$Q = 2T \left( \frac{h_0}{a} \right) e^{-\pi^2 T t / (4a^2 S)} \quad (1)$$

Sendo “Q” o escoamento de base por unidade de comprimento do rio, “T” a transmissividade, “h<sub>0</sub>” a elevação instantânea do nível d’água, “a” é a distância do córrego ao divisor de água subterrânea, “t” o tempo decorrido após a subida do lençol freático e “S” o coeficiente de armazenamento.

Ao considerar que cada pico de vazão no hidrograma representa um evento de recarga, ao empregar o princípio da superposição à Equação 1 (RUTLEDGE, 1998), tem-se a seguinte equação para o cálculo da recarga:

$$R = \frac{2(Q_2 - Q_1)K}{2,3026} \quad (2)$$

Sendo “R” a recarga para cada pico no hidrograma, “Q<sub>1</sub>” o escoamento de base antes do pico, “Q<sub>2</sub>” o escoamento de base depois do pico, e “K” o índice de recessão da curva de escoamento de base, que significa a medida de tempo necessário para que a descarga subterrânea retroceda em um ciclo logarítmico quando a curva de recessão torna linear, ou quase linear, em um hidrograma com base semilogarítmica (RUTLEDGE, 1998). Ainda segundo o autor, depois de um evento de recarga, deve-se transcorrer um certo intervalo de tempo antes que a recessão linear seja observada, e esse tempo é denominado de tempo crítico (t<sub>c</sub>), e é definido pela seguinte equação:

$$t_c = 0,2144K \quad (3)$$

A Figura 3.4 descreve o processo de estimar a recarga a partir do deslocamento das curvas de recessão.

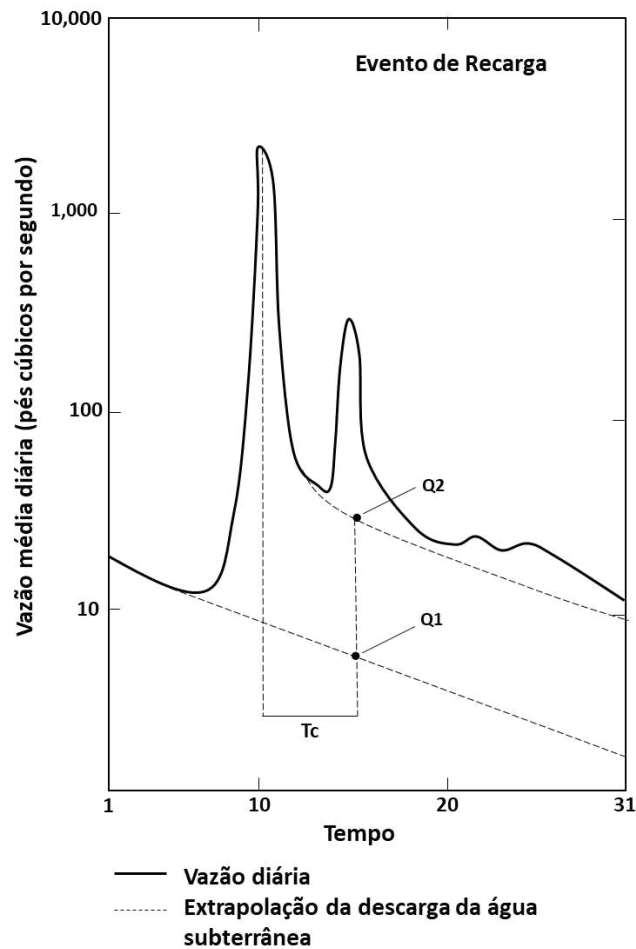


Figura 3.4 – Esquema ilustrativo da utilização do método de deslocamento das curvas de recessão para se estimar a recarga. Adaptado de Chen e Lee (2003).

A extrapolação das curvas de recessão indica qual seria a vazão caso não houvesse o evento de recarga, e a equação exponencial que descreve esse decaimento exponencial está expressa na Equação 4, e cuja inclinação da reta extrapolada é igual ao valor do índice de recessão  $K$ :

$$Q_{(t)} = Q_0 e^{-d_t/K} \quad (4)$$

Por fim, faz-se necessário determinar quais dias há valores de vazão representativos da descarga subterrânea, pois os registros de vazão no início do período de recessão podem ser provenientes ainda do escoamento direto. Portanto, deve-se definir segmentos de recessão que apresentem valores de vazão provenientes do escoamento de base. Ao utilizar a Equação 5 proposta por Linsley, Kohler e Paulhus (1982), é possível determinar quais são os dias mais representativos da descarga subterrânea (LUCAS E WENDLAND, 2010):

$$N = A^{0,2} \quad (5)$$

Em que  $N$  é o tempo entre o pico da hidrograma e o fim do escoamento superficial, e  $A$  é a área da bacia.

A fim de se diminuir o tempo de cálculo e também diminuir a subjetividade no cálculo de recarga para cada pico observado e na extrapolação da curva de recessão, o método foi automatizado por Rutledge e Daniel (1994) e Rutledge (1998) ao desenvolver os *softwares* denominados RORA, que estima a recarga em cada pico do hidrograma, e o RECESS para definição do índice de recessão  $K$  e da curva de recessão. Ambos *softwares* estão contidos no *U.S. Geological Survey Groundwater Toolbox – GWToolbox* -, versão 1.0 (Barlow *et al.*, 2015), que ainda conta com o *software* denominado BFI, capaz de definir os pontos de inflexão das curvas a partir da identificação do fluxo de mínimos registrados em um intervalo de  $N$  dias, e o *software* HYSEP, responsável por traçar linhas de conexão entre os pontos mais baixos do hidrograma de fluxo a fim de separar o fluxo de base do escoamento superficial. Todos os *softwares* citados foram utilizados durante o processo de se obter os valores de recarga.

Esses métodos para análise de hidrograma são melhor estimados quando se utiliza períodos mais longos, em escala anual. Os métodos devem ser aplicados na análise de hidrogramas de fluxo que reflitam as contribuições no escoamento superficial em resposta a um evento de precipitação, e que reflita a descarga de água subterrânea de um único aquífero. Além disso, é pressuposto pelo método que toda a recarga de água subterrânea da bacia, com exceção da água que é evapotranspirada, seja descarregada para a rede de fluxo receptora (RUTLEDGE, 2005; BARLOW *et al.*, 2015).

Segundo Rutledge (2007) e Healy (2010), *apud* BARLOW *et al.* (2015), enquanto os métodos de separação de hidrogramas se baseiam na suposição de que a descarga seja um processo contínuo, o método de deslocamento da curva de recessão se apoia na ideia de recarga episódica em resposta a eventos de tempestade.

Segundo Healy (2010), poucos aquíferos estarão totalmente em conformidade com todas as premissas inerentes à derivação do método de deslocamento da curva de recessão. Porém, o programa RORA é amplamente utilizado desde seu lançamento e suas aplicações resultam em valores de recarga consistentes com outros métodos de estimativa de recarga bacinal (BARLOW *et al.*, 2015).

Optou-se por aplicá-lo por ser um método automático baseado em algoritmos, o que retira com isso a subjetividade manual do traçado das curvas de recessão. Além disso, possui uma interface gráfica gratuita e amplamente utilizada em outros estudos. Ademais, esse método foi anteriormente utilizado na área de estudo por de Paula (2019), permitindo realizar uma comparação entre os resultados obtidos com a atualização das curvas-chave dos cursos d'água.

### 5.2.2 Método do Filtro Digital Recursivo (LYNE E HOLLICK, 1979)

A técnica de fluxo de base diária utilizada como modelo para a adequação ao modelo de fluxo mensal, utiliza o parâmetro de filtro recursivo digital criado por Lyne e Hollick (1979) e implementado para análises de separação de fluxo de base por Nathan e McMahon (1990). Ela se baseia no fenômeno ondulatório e separa o fluxo associando-o a ondas de baixa frequência (fluxo de base) das ondas de alta frequência (fluxo superficial). Segundo Nathan e McMahon (1990), apesar de não haver uma correlação física entre os fenômenos, o método fornece uma estimativa objetiva e repetível de um índice de fluxo de base que é facilmente automatizado (NATHAN e MCMAHON, 1990).

A equação que representa o filtro recursivo está representada a seguir:

$$f_k = \alpha f_{(k-1)} + \frac{(1+\alpha)}{2} (y_k - y_{(k-1)}) \quad (6)$$

Onde  $f_k$  é a resposta rápida filtrada no k-ésimo instante de filtragem,  $y_k$  é a vazão original e  $\alpha$  é o parâmetro de filtro, e o fluxo de base filtrado é definido como  $y_k - f_k$ . O filtro digital gera fluxos de bases mais altos e realistas sob picos intermitentes do que quando é usada a abordagem de mínimos suavizados (quando há um incremento gradual do nível d'água a partir de eventos pluviométricos, impossibilitando o esgotamento total do evento inicial). Dessa maneira, a curva de recessão do fluxo de base gerada pelo método de filtro digital não segue a função de decaimento exponencial associada ao esgotamento do armazenamento (NATHAN e MCMAHON, 1990).

Este método foi adaptado por Smakhtin (2001) para a aplicação na África do Sul, onde há ampla disponibilidade de séries temporais de fluxo mensal. Segundo Smakhtin (2001), as séries temporais de fluxo de base mensais podem ser úteis para se desenvolver estratégias de gestão de bacias hidrográficas, estimativa de pequenas e médias reservas de água, gestão de qualidade da água e salinidade, estimativa de recarga de águas subterrâneas, entre outras aplicações.

Segundo Smakhtin (2001), a abordagem mais direta de se estimar uma série temporal de fluxo de base mensal é pela identificação de um método adequado de separação de vazão de base diária e a partir daí ajustá-lo para a aplicação com registros de vazão mensal. Esses ajustes se fazem necessários por conta das diferenças na variabilidade do fluxo de base diária e mensal.

Para o contexto da separação mensal do fluxo de base, as equações da técnica de modelo digital recursivo são reescritas da seguinte forma:

$$q_m = a q_{m-1} + 0,5(1+a)(Q_m - Q_{m-1}) \quad (7)$$

$$QB_m = Q_m - q_m \quad (8)$$

Em que “q” é a parcela do fluxo mensal que pode ser atribuída a eventos de alto fluxo (fluxo rápido ou sinal de alta frequência), “Q” é o fluxo mensal total, “QB” a parcela do fluxo mensal total que pode ser atribuído ao fluxo de base (sinal de baixa frequência), “a” é o parâmetro de filtro recursivo, “m” o índice do mês atual em uma série temporal, e “m – 1” o índice do mês anterior.

Em relação ao parâmetro de filtro recursivo, Smakhtin (1997) definiu que os valores mais adequados de filtro normalmente variam na faixa de 0,985 a 0,995, e recomendou o valor de 0,995 como sendo adequado para a maioria das separações diárias de fluxo de base. Ainda segundo os autores, para eventos de pluviometria maiores que 1100 mm, o parâmetro de filtro pode chegar a ser até 2,5% menor que o parâmetro de filtro de 0,92, ou seja, até 0,875.

O método foi aplicado de forma automatizada utilizando-se para tanto uma planilha Excel com as fórmulas discriminadas para todas as bacias estudadas. O parâmetro de filtro utilizado variou entre 0,875 a 0,9, e foram os valores mais apropriados após realização de testes para definição do melhor valor para cada bacia.

A justificativa para se utilizar essa técnica é pela facilidade de aplicação automatizada, por ser muito utilizada em iniciativas privadas e órgãos gestores, e por ser uma técnica aplicada para dados mensais de vazão, o que permite estudos aplicados em bacias onde os dados de vazão são monitorados de forma mensal, e não diária.

### 5.2.3 Método da Variação do Nível d'água - VNA (HEALY E COOK, 2002)

O método de variação do nível d'água (VNA), ou Water Table Flutuation (WTF) foi desenvolvido por Healy e Cook (2002) para a estimativa de recarga a partir da premissa de que as elevações do nível de água subterrânea na superfície potenciométrica ocorre devido à recarga aquífera, e é expressa pela equação a seguir:

$$R = S_y \cdot \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (9)$$

Onde “R” é a recarga, “Sy” o armazenamento específico, “h” a altura do nível d'água e “t” o tempo. Pela equação, considera-se que a água que entra no lençol freático vai ser imediatamente armazenada.

Segundo Scanlon, Healy e Cook (2002), o método se aplica melhor para curtos períodos de tempo (horas ou dias) em regiões com lençóis freáticos rasos e que apresentem aumentos e diminuições acentuadas nos níveis d'água. Segundo os autores, as maiores dificuldades na aplicação do método estão na definição de um rendimento específico que seja representativo da área e na garantia de que as flutuações nos níveis d'água dos poços são devido às recargas e não a outros fatores tais quais a mudança na pressão atmosférica, a presença de ar aprisionado ou bombeamento de água.

Dessa forma, é importante que se defina períodos com episódios de chuva bem demarcados para a avaliação da variação do nível causada por este evento. Segundo Healy (2010), cada elevação individual de nível será gerada uma estimativa de recarga. Conforme a figura a seguir, a diferença de nível d'água será igual à diferença entre o ponto mais alto de nível d'água e o ponto mais baixo da curva de recessão extrapolada, que é o traço que o hidrograma apresentaria caso não ocorresse o evento de chuva (Figura 3.5).



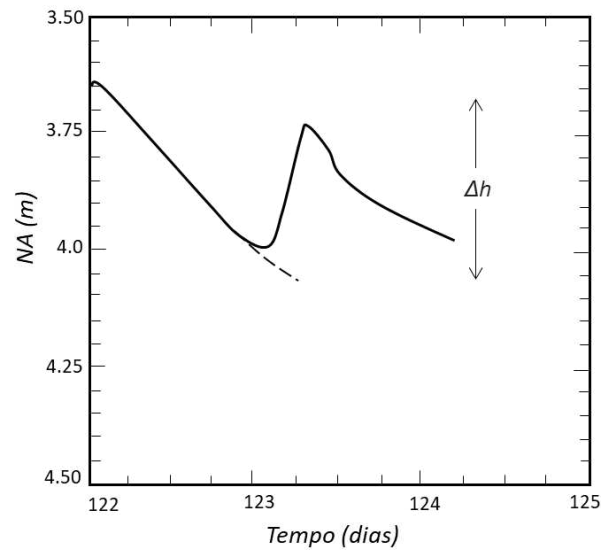


Figura 3.5 – Aumento hipotético do nível d'água em resposta à chuva.  $\Delta h$  representa a diferença entre o pico do aumento do nível e o ponto mais baixo da curva de recessão que antecede o evento de chuva (adaptado de Healy e Cook, 2002).

O valor de  $S_y$  da região de estudo foi calculado por Paula (2019) a partir dos testes de recuperação de 99 poços, e obteve-se um valor médio de 0,0646. Esse valor foi utilizado para a aplicação do método.

Optou-se por utilizar esse método pelo fato de sua aplicação não depender de monitoramento de vazão superficial, o que se torna muito útil para regiões onde esse monitoramento não é realizado. Além disso, o método garante um resultado pontual de recarga subterrânea, o que permite quantificar as recargas em cada unidade aquífera.

Sempre que possível, foi selecionado mais de uma porção do gráfico dos poços de um mesmo ano hidrológico para avaliar a variação do nível d'água em mais de um evento de chuva. Nos poços que apresentaram uma variação do nível d'água mais rápida e mais acentuada, em resposta a um evento de chuva isolado, a aplicação do método foi melhor, já que dessa forma são formados picos de variação e curvas de recessão mais bem demarcados. Ressalta-se que a delimitação da curva de recessão prolongada se faz de forma manual, e, portanto, o método em si é mais suscetível a variações e subjetividades em relação aos métodos anteriores, que foram aplicados de forma automática.

A flutuação do lençol freático no aquífero está relacionada a fraturas e condutos. Além disso, sabe-se que, em um sistema cárstico, o grau de heterogeneidade e anisotropia pode interferir na avaliação do método, principalmente porque no terreno cárstico com rochas de idade neoproterozoica a porosidade primária é muito baixa (GALVÃO, HALIHAN e HIRATA, 2016). Apesar dessas limitações, devido ao alto grau de conectividade entre fraturas e condutos, o sistema aquífero pode ser considerado um equivalente poroso (ANDERSON & WOESSNER,

1992; FORD & WILLIAMS, 1989; PEREIRA, 2022; DANTAS, 2023), justificando sua aplicação. Como exemplo de aplicação em terrenos cársticos desenvolvidos, Soares (2012) aplicou o método no aquífero cárstico da bacia do rio Riachão, no norte de Minas Gerais, Brasil.

O valor de recarga média de cada poço foi plotado e interpolado em um mapa a fim de se observar espacialmente a existência de alguma relação da recarga com a distribuição geológica da área. Foi utilizado como interpolador o inverso da distância ao quadrado (IDW) disponível no ArcMap 10.8. Segundo Landim (2000), algumas das vantagens desse método de interpolação são o fato dele ser fiel aos valores originais amostrados, o que significa que ele não extrapola os valores mínimos e máximos amostrados; e por ser útil na análise de variações de pequena amplitude, com anomalias de valores e distribuição irregular no espaço, que é o caso dos dados analisados.

#### **5.2.4 *Balanço Hidroclimatológico***

O método de balanço hidroclimatológico definido por Thornthwaite e Mather (1955) foi empregado para quantificar a entrada e saída de água no solo e fazer uma comparação dos valores obtidos de excedente hídrico com o escoamento total obtido a partir dos hidrogramas. A entrada de água no sistema é calculada a partir dos dados de pluviometria mensais, temperatura média mensal da região, a latitude e longitude da área para a contabilização do número de horas de insolação, além da capacidade de água disponível no solo (CAD). Os parâmetros de saída são a evapotranspiração potencial (ETP), o excedente hídrico (EXC) e o *deficit* hídrico (DEF). Os cálculos foram realizados em uma planilha Excel automatizada desenvolvida por Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998) e que, além de voltar os índices de ETP, EXC e DEF mensais, são elaborados gráficos e tabelas com essa distribuição de valores mensais.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Caracterização Climatológica

O polígono de Thiessen (Figura 3.2) para o histórico de 40 anos indicou a predominância da influência da estação de pluviométrica de Lagoa Santa, que abarca 52% da área, precedida da influência da estação de Pedro Leopoldo, com 27%. Nota-se que a distribuição pluviométrica diminui de oeste para leste. A região de Sete Lagoas apresentou maiores taxas pluviométricas com médias históricas de aproximadamente 1337 mm, precedido da estação de Pedro Leopoldo, com aproximadamente 1246 mm. Para o período analisado, obteve-se valores de precipitação de Thiessen de 1174 mm, valor que se assemelha aos dados observados na estação de Lagoa Santa, fato esperado devido à maior influência desta estação na área de estudo.

Essa relação espacial da distribuição pluviométrica é importante pois indica uma relação direta com a análise de recarga pelo método de separação de escoamento, uma vez que esse leva em consideração a vazão dos cursos d'água e, conseqüentemente, sua localização sobre o polígono de Thiessen (Figura 3.2).

Foram correlacionadas a pluviometria das regiões e a variação da chuva com os dados monitorados de vazão superficial e com o nível d'água subterrânea (Figura 3.6). Desta forma, foi possível avaliar se o período de monitoramento foi um período atípico ou consoante com valores hidrológicos históricos.

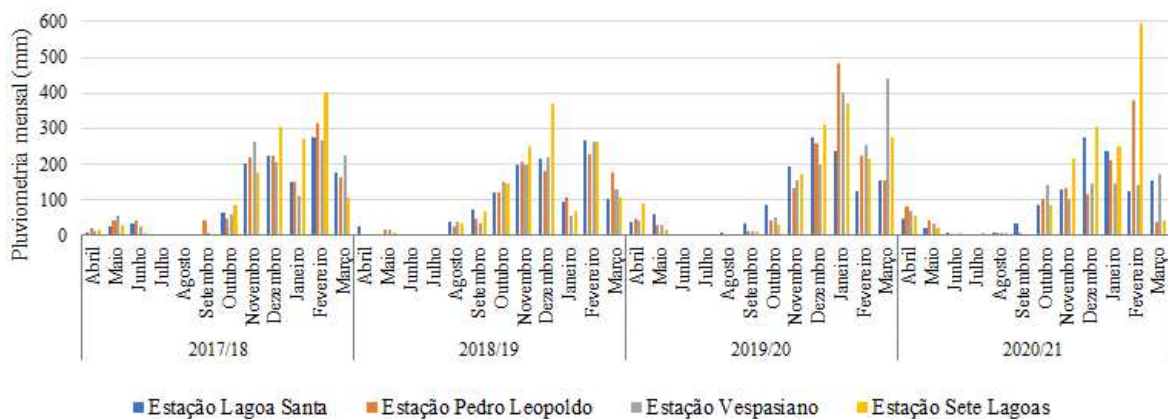


Figura 3.6 - Distribuição pluviométrica dos anos hidrológicos monitorados.

Os ciclos hidrológicos monitorados mostraram uma distribuição simétrica para os períodos de chuva, com pico de simetria entre o mês de dezembro e janeiro. Apenas no mês de fevereiro de 2021 observa-se uma anomalia a partir de valores de chuva mais elevados neste mês (Figura 3.6).

Ao avaliar os totais anuais de cada ano hidrológico, percebe-se uma variação de um ciclo de alta (2017/18 e 2019/20) seguido de um ciclo de baixa (2018/19 e 2020/21) pluviometria para as estações, com exceção da estação de Sete Lagoas, que apresentou mais um ciclo de alta em 2020/21 (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Totais pluviométricos históricos e dos anos hidrológicos monitorados.

| <b>Período</b>                     | <b>Estação Lagoa Santa</b> | <b>Estação Pedro Leopoldo</b> | <b>Estação Vespasiano</b> | <b>Estação Sete Lagoas</b> |
|------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| <i>Média Histórica 1980 -2020</i>  | 1091,0                     | 1245,8                        | 1228,5                    | 1337,0                     |
| <i>Ano Hidrológico 2017 - 2018</i> | 1160,4                     | 1268,7                        | 1233,1                    | 1408,9                     |
| <i>Ano Hidrológico 2018 - 2019</i> | 1142,0                     | 1119,9                        | 1109,4                    | 1324,4                     |
| <i>Ano Hidrológico 2019 - 2020</i> | 1211,4                     | 1384,2                        | 1586,9                    | 1493,4                     |
| <i>Ano Hidrológico 2020 - 2021</i> | 1135,0                     | 1124,4                        | 977,8                     | 1601,4                     |

Ao comparar os totais dos anos hidrológicos com a média histórica, nota-se que os valores de Lagoa Santa e Vespasiano foram superiores à média histórica para todos os anos. Já na estação Pedro Leopoldo, os valores foram menores que a média nos ciclos de baixa, e maiores que a média nos ciclos de alta, enquanto a estação de Sete Lagoas só esteve maior que a média história no ano hidrológico de 2020/21. De modo geral, as anomalias com variação superior a 15% dos valores históricos foram constatadas para a estação de Sete Lagoas para os ciclos de 2018/19, 2019/20 e 2020/21, e na estação de Vespasiano durante os ciclos 2019/20 e 2020/21.

A partir dessas análises, pressupõe-se que os dados de recarga apresentados nesse trabalho serão representativos para as médias históricas pluviométricas da região, com algumas anomalias pluviométricas já relatadas. As análises pluviométricas foram imprescindíveis para avaliar os percentuais anuais de recargas que serão mostradas adiante.

A partir dos dados de pluviometria de Thiessen, do cálculo do índice de CAD (capacidade de água disponível no solo) de 248 mm para a região realizado por Viana *et al.* (1998), e dos valores de temperatura disponíveis na estação de Sete Lagoas, foi elaborado o balanço climatológico de Thornthwaite e Mather (1955) a partir da planilha de Rolim *et al.* (1998) e o resultado está representado na Figura 3.7.

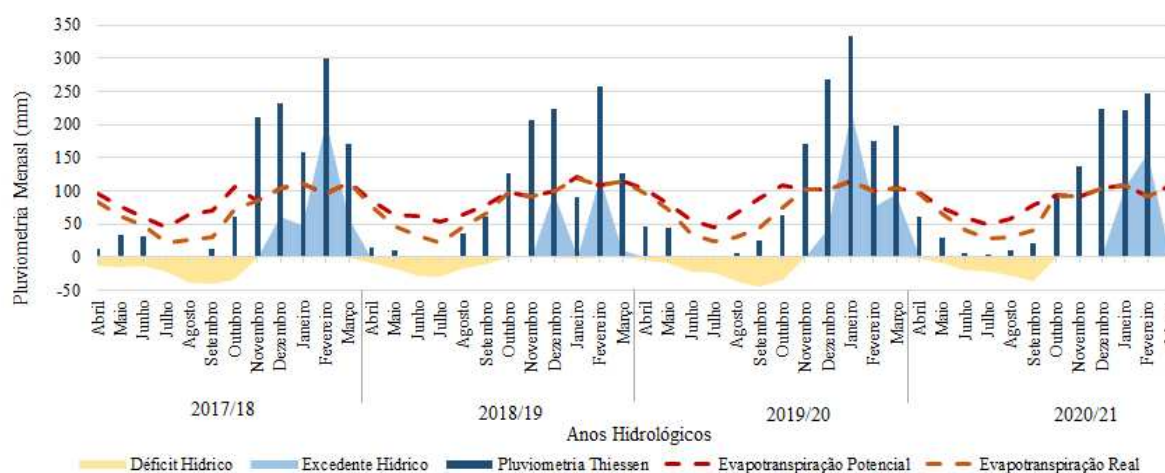


Figura 3.7 – Distribuição do balanço climatológico para anos hidrológicos estudados a partir da utilização do método de Thornthwaite e Mather (1955) com utilização da planilha eletrônica de Rolim *et al.* (1998).

Com exceção do ano hidrológico de 2020/2021, houve excedente hídrico de novembro a março, e nos demais meses houve déficit hídrico. O mês de setembro apresentou maior déficit, e é o mês quando se espera encontrar níveis mais baixos do aquífero.

Os valores de excedente hídrico e os volumes totais de excedente hídrico para a área (505 km<sup>2</sup>), isto é, água disponível não evaporada, foram expressos na tabela abaixo.

Tabela 3.2 – Valores calculados de EXC e do volume total do EXC total calculado a partir da área de 505 km<sup>2</sup> da região estudada.

| Período | Excedente Hídrico (mm) | Volume Total de Excedente Hídrico (m <sup>3</sup> ) |
|---------|------------------------|---|
| 2017/18 | 372,6                  | 188.161.774   |
| 2018/19 | 228,1                  | 115.413.749   |
| 2019/20 | 433,6                  | 219.825.570   |
| 2020/21 | 266,9                  | 135.589.692   |

Os volumes calculados do excedente hídrico total por ano hidrológico correspondem ao somatório do escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo, além da recarga efetiva do aquífero. Ao aproximar a área de estudo a um sistema hidrológico fechado, ou seja, onde não ocorre recarga alóctone e apenas recarga pluviométrica, a simples aplicação destes cálculos de volume permitiu calcular o volume de água disponível não evaporada, desconsiderando retiradas antrópicas de água do sistema, tais como bombeamento. Após os cálculos de valores de recarga e escoamento, que serão apresentados nas próximas seções, foi possível mensurar, além da recarga líquida efetiva, o volume de água explorada deste sistema, seja ela subterrânea ou superficial.

## **6.2 Cálculo de Recarga pelo Método de Deslocamento de Curvas de Recessão**

Por meio dos softwares BFI e HYSEP foram obtidas as hidrógrafas com separação escoamento superficial e de base versus a precipitação em cada bacia hidrogeológica (Figura 3.8), onde se observou a rápida resposta das vazões aos eventos de precipitação. O maior volume precipitado nos dois últimos ciclos hidrológicos acarretou em um aumento do escoamento de base.

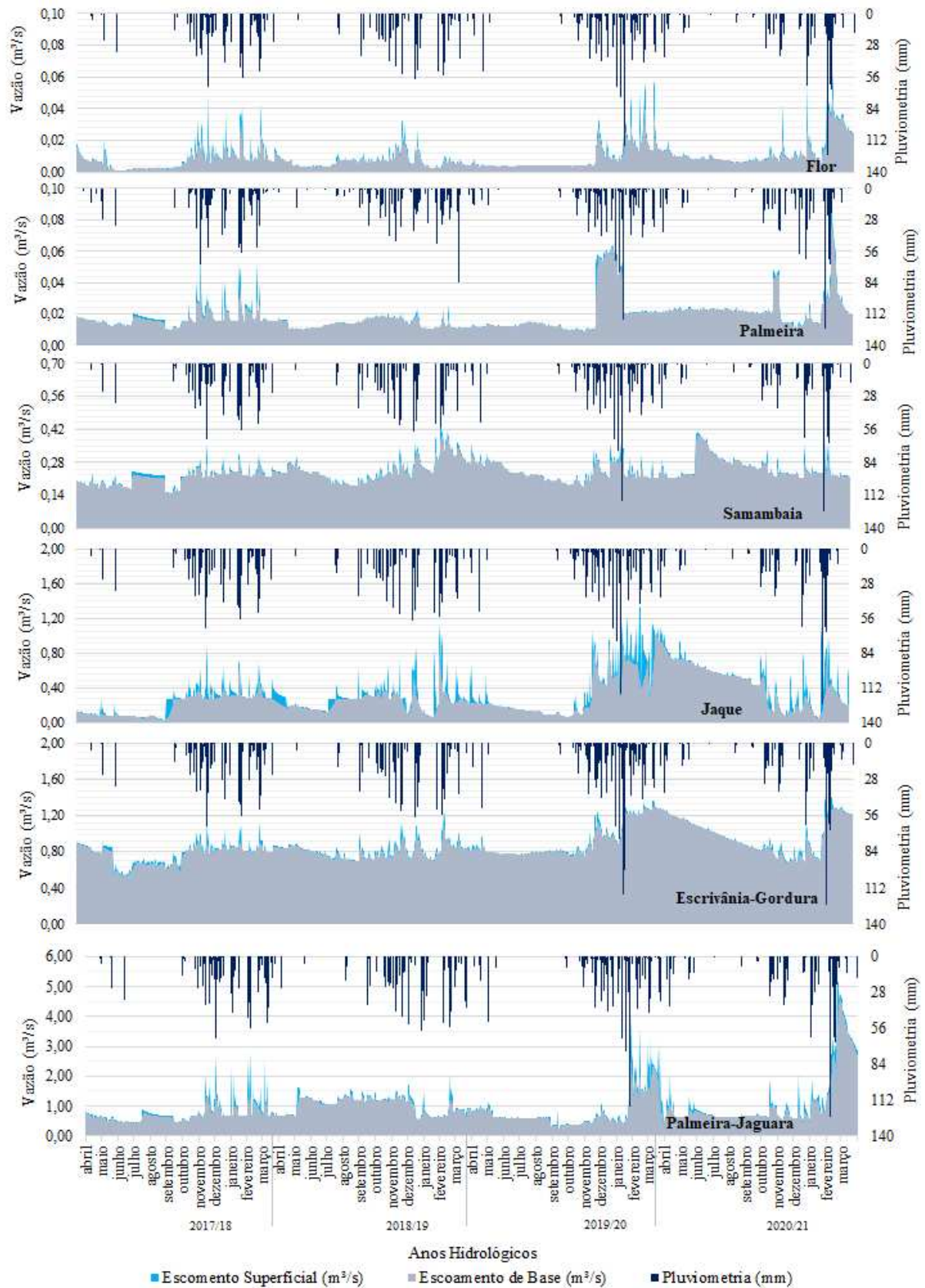


Figura 3.8 – Hidrógrafas das vazões diárias com a separação de escoamento superficial e de base das bacias hidrogeológicas monitoradas e os eventos pluviométricos ocorridos em cada bacia.

Ao avaliar os eventos pluviométricos com variação das vazões ao longo do tempo, observa-se que, da mesma forma que a elevação de nível, a descarga da água subterrânea também ocorreu de maneira rápida, característica de bacias cársticas, fato evidenciado principalmente nas bacias do Palmeira e Samambaia. Já as bacias que possuem maior influência de rochas metapelíticas tenderam a apresentar uma descarga mais lenta, como é verificado principalmente na bacia do Jaque.

As bacias Flor e Jaque apresentaram menores índices de fluxo de base, característico de ambientes de permeabilidade menor (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Valores de escoamento para as bacias estudadas durante os anos hidrológicos calculado através dos softwares BFI e HYSEP.

| Bacia   | Ano Hidrológico | Escoamento Total (m <sup>3</sup> /s) | Escoamento de Base (m <sup>3</sup> /s) | Escoamento Superficial (m <sup>3</sup> /s) | Índice Fluxo de base (%) |
|---|-----------------|--------------------------------------|--|--|--------------------------|
| <i>Flor (16 km<sup>2</sup>)</i>                 | 2017/18         | 3,08                                 | 2,63                                   | 0,45                                       | 85                       |
|   | 2018/19         | 2,75                                 | 2,51                                   | 0,24                                       | 91                       |
|   | 2019/20         | 3,47                                 | 3,04                                   | 0,43                                       | 88                       |
|   | 2020/21         | 5,00                                 | 4,66                                   | 0,34                                       | 93                       |
| <i>Palmeira (31 km<sup>2</sup>)</i>             | 2017/18         | 6,58                                 | 6,10                                   | 0,49                                       | 93                       |
|   | 2018/19         | 5,23                                 | 5,10                                   | 0,12                                       | 98                       |
|   | 2019/20         | 7,34                                 | 7,14                                   | 0,21                                       | 97                       |
|   | 2020/21         | 8,73                                 | 8,42                                   | 0,31                                       | 96                       |
| <i>Samambaia (48 km<sup>2</sup>)</i>            | 2017/18         | 79,35                                | 76,88                                  | 1,21                                       | 97                       |
|   | 2018/19         | 91,64                                | 89,34                                  | 1,25                                       | 97                       |
|   | 2019/20         | 89,34                                | 87,20                                  | 1,25                                       | 98                       |
|   | 2020/21         | 95,11                                | 93,36                                  | 1,25                                       | 98                       |
| <i>Jaque (59,6 km<sup>2</sup>)</i>              | 2017/18         | 83,56                                | 70,34                                  | 13,21                                      | 84                       |
|   | 2018/19         | 107,16                               | 86,14                                  | 21,02                                      | 80                       |
|   | 2019/20         | 135,97                               | 109,24                                 | 26,73                                      | 80                       |
|   | 2020/21         | 184,46                               | 163,73                                 | 20,73                                      | 89                       |
| <i>Escrivânia – Gordura (96 km<sup>2</sup>)</i> | 2017/18         | 284,93                               | 275,89                                 | 9,04                                       | 97                       |
|   | 2018/19         | 298,48                               | 290,55                                 | 7,92                                       | 97                       |
|   | 2019/20         | 337,73                               | 331,75                                 | 5,97                                       | 98                       |
|   | 2020/21         | 362,54                               | 356,86                                 | 5,68                                       | 98                       |
| <i>Palmeira – Jaguará (156 km<sup>2</sup>)</i>  | 2017/18         | 289,33                               | 257,16                                 | 32,18                                      | 89                       |
|   | 2018/19         | 393,92                               | 375,20                                 | 18,73                                      | 95                       |
|   | 2019/20         | 317,12                               | 284,83                                 | 32,29                                      | 90                       |
|   | 2020/21         | 442,67                               | 406,47                                 | 36,20                                      | 92                       |

A partir dos índices que fluxo de base, observou-se uma forte influência das águas subterrâneas para o sistema, principalmente nas quatro bacias carbonáticas, cujas médias anuais foram superiores a 92%.

As produtividades totais calculadas das bacias são de 3,34 m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup> para bacia do Escrivânia–Gordura, seguida 2,31 m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup> para a bacia Palmeira–Jaguará, 2,14 m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup> para a bacia do Jaque, 1,85 m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup> para bacia do Samambaia e 0,22 m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup> para as bacias do Flor e Palmeira. A três bacias cársticas de alta vazão apresentaram altas produtividades, características de um sistema cárstico desenvolvido. Verifica-se ainda uma elevada



produtividade da bacia do Jaque, o que pode indicar o recebimento de contribuições subterrâneas dos sistemas carbonáticos fechados localizados a oeste. Os baixos valores de produtividade das bacias dos córregos Palmeira e do Flor podem estar relacionados a captações superficiais nestas bacias e a sistemas menos evoluídos.

Ao comparar os valores de volume de água obtidos do escoamento total da área (desconsiderando as entradas alóctones) com os volumes de excedente hídrico calculados a partir do balanço climatológico, o escoamento total representou, nos anos de 2017/18, 2018/19, 2019/20 e 2020/21, 34%, 67%, 35% e 70% do excedente hídrico dos respectivos anos. Se fosse considerada a recarga alóctone desconhecida, o escoamento total representaria um valor ainda menor do excedente hídrico.

Essa diferença confirma a hipótese de De Paula (2019), que descreve elevados valores de captações de água superficial e subterrâneas na área de estudo. Esse fato é relevante pois todos os valores de recarga aqui apresentados devem estar subestimados devido a retiradas de água subterrânea do sistema. Ressalta-se ainda que, conforme De Paula (2019), há apenas dois locais com entradas alóctones conhecidas da área de estudo, corroborando com a hipótese de valores de recarga subestimados devido a retiradas de água por bombeamento.

A partir dos valores de escoamento subterrâneo, foi calculado os valores de recarga mensal para cada bacia hidrogeológica (Figura 3.9). Foram utilizados os valores de pluviometria da estação Lagoa Santa para se comparar com os valores mensais de recarga, visto que essa estação exerce influência em cinco das seis bacias da região. Apesar do córrego Palmeira ser influenciado pela estação de Pedro Leopoldo, os valores mensais das duas estações são muito semelhantes.

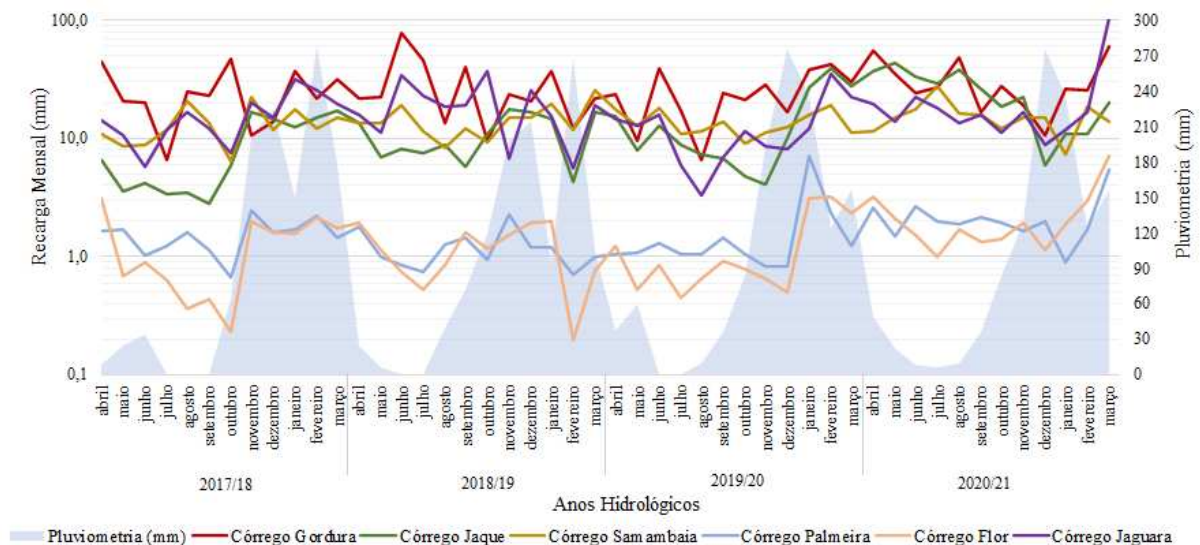


Figura 3.9 – Valores mensais de recarga para as bacias hidrogeológicas monitoradas e variações pluviométricas da Estação Lagoa Santa.

A variação mensal de recarga é muito influenciada pelos eventos de precipitação, fato evidenciado no mês de janeiro do ano hidrológico 2018/19, que apresentou baixos valores de precipitação para o período chuvoso, o que provocou em todas as bacias uma queda acentuada da recarga após esse período.

De forma geral, tanto o escoamento subterrâneo quanto a recarga foram influenciados pela elevação pluviométrica nos dois últimos anos hidrológicos. Ao observar os picos de recarga nos períodos secos, os córregos de alta vazão localizados nas bacias carbonáticas (Palmeira-Jaguara, Escrivânia-Gordura e Samambaia) apresentaram uma curva de desaguamento mais lenta, indicando condições de maior armazenamento, ou mesmo uma influência de recargas mais profundas.

Foi constatado que, de forma geral, todos os cursos d'água apresentaram valores mais elevados no último ciclo, seguindo o padrão das vazões monitoradas e dos escoamentos subterrâneos já apresentados (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Valores de recarga e taxas de recargas para as bacias estudadas, calculados pelo método de Rorabaugh (1964) a partir do *software* RORA.

| Bacia   | Ano Hidrológico | Recarga (mm) | Pluviometria (mm) | Taxa Recarga (%) | Índice Recessão |
|---|-----------------|--------------|-------------------|------------------|-----------------|
| <i>Flor (16 km<sup>2</sup>)</i>                 | 2017/18         | 15,41        | 1160,40           | 1,33             | 31,6            |
|   | 2018/19         | 13,63        | 1142,00           | 1,19             |                 |
|   | 2019/20         | 15,28        | 1211,36           | 1,26             |                 |
|   | 2020/21         | 27,34        | 1135,01           | 2,41             |                 |
| <i>Palmeira (31 km<sup>2</sup>)</i>             | 2017/18         | 20,20        | 1268,69           | 1,59             | 60,5            |
|   | 2018/19         | 12,62        | 1119,94           | 1,13             |                 |
|   | 2019/20         | 20,32        | 1384,20           | 1,47             |                 |
|   | 2020/21         | 26,23        | 1124,40           | 2,33             |                 |
| <i>Samambaia (48 km<sup>2</sup>)</i>            | 2017/18         | 167,84       | 1160,40           | 14,46            | 124,3           |
|   | 2018/19         | 174,20       | 1142,00           | 15,25            |                 |
|   | 2019/20         | 163,21       | 1211,36           | 13,47            |                 |
|   | 2020/21         | 185,48       | 1135,01           | 16,34            |                 |
| <i>Jaque (59.6 km<sup>2</sup>)</i>              | 2017/18         | 105,91       | 1160,40           | 9,13             | 20,4            |
|   | 2018/19         | 131,69       | 1142,00           | 11,53            |                 |
|   | 2019/20         | 171,42       | 1211,36           | 14,15            |                 |
|   | 2020/21         | 295,39       | 1135,01           | 26,03            |                 |
| <i>Escrivânia – Gordura (96 km<sup>2</sup>)</i> | 2017/18         | 300,95       | 1160,40           | 25,93            | 108,7           |
|   | 2018/19         | 344,90       | 1142,00           | 30,20            |                 |
|   | 2019/20         | 296,91       | 1211,36           | 24,51            |                 |
|   | 2020/21         | 375,23       | 1135,01           | 33,06            |                 |
| <i>Palmeira – Jaguara (156 km<sup>2</sup>)</i>  | 2017/18         | 190,71       | 1160,40           | 16,44            | 69,6            |
|   | 2018/19         | 231,51       | 1142,00           | 20,27            |                 |
|   | 2019/20         | 156,96       | 1211,36           | 12,96            |                 |
|   | 2020/21         | 272,41       | 1135,01           | 24,00            |                 |

A bacia do córrego Jaque e as três bacias carbonáticas de alta vazão (Escrivânia-Gordura, Palmeira-Jaguara e Samambaia) obtiveram médias de valores de recarga mais elevados. Pelo fato da bacia do Jaque estar localizada sobre rochas metapelíticas, a hipótese já levantada de que esta bacia recebe contribuições de água subterrânea das bacias a oeste se torna mais plausível.

Foram obtidos os seguintes valores de produtividade de recarga pela área: 3,60 mm/km<sup>2</sup> para bacia do Samambaia, 3,43 mm/km<sup>2</sup> para a bacia do Escrivânia–Gordura, 2,95 mm/km<sup>2</sup> para o Jaque, 1,36 mm/km<sup>2</sup> para a bacia do Palmeira–Jaguara, 1,12 mm/km<sup>2</sup> para bacia do Flor e 0,64 mm/km<sup>2</sup> para bacia do córrego Palmeira. As três grandes bacias carbonáticas apresentaram elevados valores de produtividade, contudo, ressalta-se que a bacia do córrego Samambaia, de maior produção, tem seu fluxo regularizado por um barramento a montante. Os elevados valores apresentados por essas bacias são reflexos das características de bacias cársticas extremamente evoluídas, com destaque para a bacia do Escrivânia–Gordura como uma importante área de recarga para todo o sistema da área. O elevado valor encontrado na bacia do córrego Jaque pode ser explicado por possíveis influências diretas de bacias carbonáticas na região a oeste desta, uma vez que o fluxo regional de aquífero ocorre de oeste para leste e as bacias a oeste são todas fechadas. Os menores valores apresentados na bacia do córrego Palmeira em relação ao córrego Flor podem estar relacionados a maiores volumes captados no córrego Palmeira. Este, por sua vez, por estar conectado à bacia do Palmeira-Jaguara, exerce uma influência negativa nesta última, o que acarreta na diminuição de sua produtividade em relação aos valores observados nas outras duas bacias carbonáticas.

A recarga pluviométrica média para as bacias durante os quatro anos hidrológicos foi de 154,82 mm, ou 13,35% da pluviometria, valor semelhante ao calculado por De Paula (2019), de 119 mm (12% da pluviometria).

### **6.3 Cálculo de Recarga pelo Método Filtros Digitais Recursivos a Partir de Séries Mensais**

A partir dos valores diários de vazão monitorados, foram retornadas as médias mensais dessas vazões e geradas as hidrógrafas com a separação do escoamento de base e superficial concomitante à soma mensal da pluviometria (Figura 3.10).

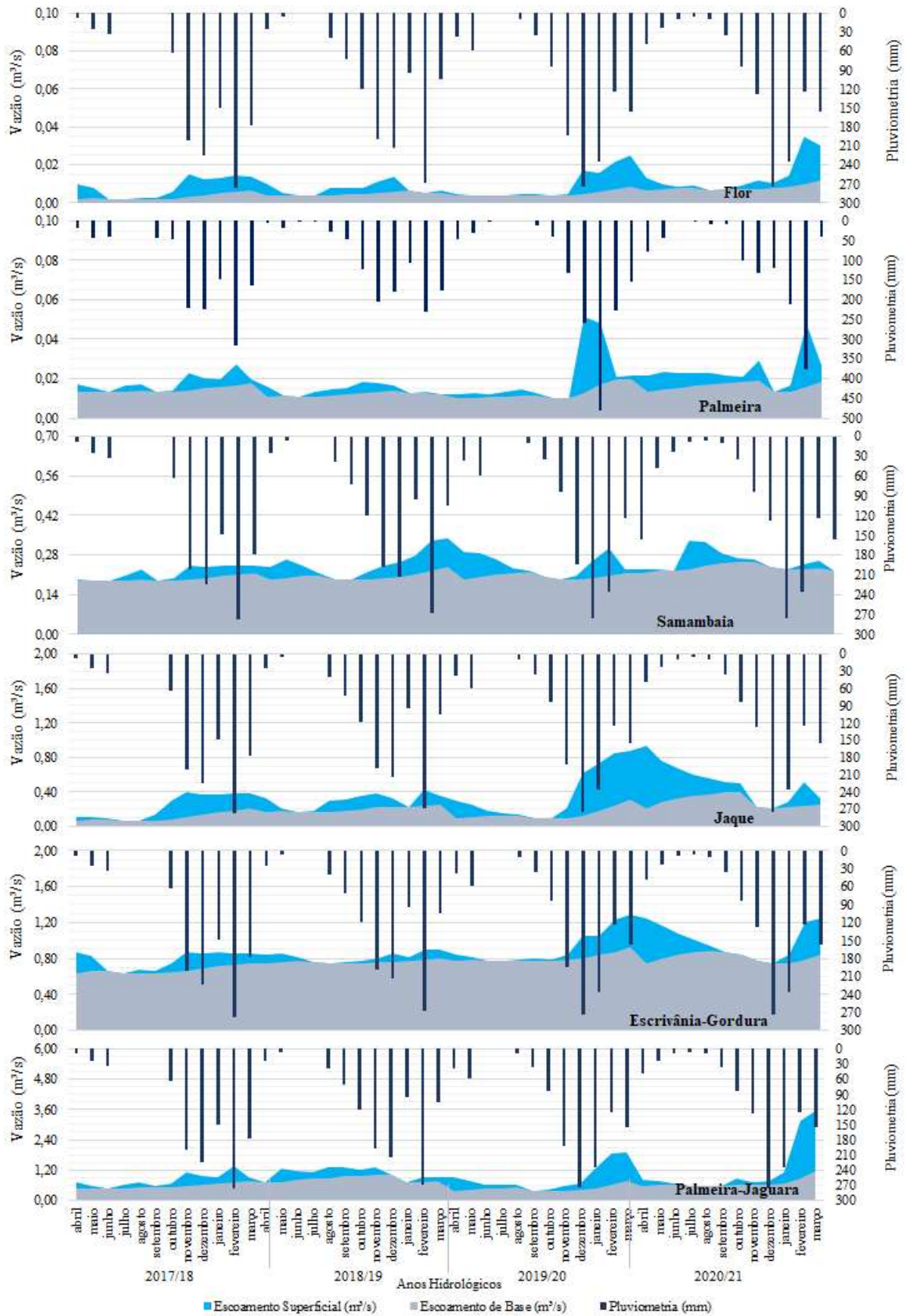


Figura 3.10 - Hidrógrafas das vazões mensais com separação dos escoamentos superficial e subterrâneo das bacias hidrogeológicas monitoradas, concomitantes aos eventos pluviométricos ocorridos em cada bacia. Método utilizado para a separação do escoamento foi Lyne e Hollick (1979) e adaptado por Smakhtin (2001).

É notória a suavização dos máximos e mínimos da Figura 3.10 comparado com a Figura 3.9, com representação diária dos valores de vazão do método anterior, o que deve ocasionar subdimensionamento dos volumes do escoamento total, do escoamento subterrâneo (Tabela 3.5) e também dos valores de recarga. De fato, esses valores de escoamentos, Total e de Base, foram menores comparados aos obtidos pelo método de curva de recessão de Rorabaugh (1964) (Tabela 3.3). O percentual dos escoamentos comparados com os escoamentos obtidos por Rorabaugh (1964) foi indicado na tabela abaixo.

Tabela 3.5 – Valores de escoamentos calculados pelo método de Lyne e Hollick (1979) adaptado por Smakhtin (2001). Foi indicado o percentual dos escoamentos comparados com os escoamentos obtidos por Rorabaugh (1964).

| Bacia   | Ano Hidrológico | Escoamento Total (m <sup>3</sup> /s) |       | Escoamento de Base (m <sup>3</sup> /s) |       | Escoamento Superficial (m <sup>3</sup> /s) |         |
|---|-----------------|--------------------------------------|-------|--|-------|--|---------|
| <i>Flor (16 km<sup>2</sup>)</i>                 | 2017/18         | 3,05                                 | 99,1% | 1,14                                   | 43,3% | 1,91                                       | 425,6%  |
|   | 2018/19         | 2,70                                 | 98,5% | 1,66                                   | 66,4% | 1,04                                       | 432,2%  |
|   | 2019/20         | 3,41                                 | 98,5% | 1,75                                   | 57,7% | 1,66                                       | 389,9%  |
|   | 2020/21         | 4,98                                 | 99,6% | 2,86                                   | 61,5% | 2,11                                       | 627,0%  |
| <i>Palmeira (31 km<sup>2</sup>)</i>             | 2017/18         | 6,51                                 | 99,0% | 5,18                                   | 84,9% | 1,34                                       | 275,4%  |
|   | 2018/19         | 5,16                                 | 98,6% | 4,34                                   | 85,1% | 0,81                                       | 658,4%  |
|   | 2019/20         | 7,19                                 | 97,9% | 4,65                                   | 65,2% | 2,54                                       | 1215,2% |
|   | 2020/21         | 8,68                                 | 99,4% | 5,78                                   | 68,7% | 2,90                                       | 933,1%  |
| <i>Samambaia (48 km<sup>2</sup>)</i>            | 2017/18         | 78,28                                | 98,7% | 70,60                                  | 91,8% | 7,68                                       | 635,5%  |
|   | 2018/19         | 90,53                                | 98,8% | 73,94                                  | 82,8% | 16,59                                      | 1330,1% |
|   | 2019/20         | 87,84                                | 98,3% | 74,29                                  | 85,2% | 13,55                                      | 1083,8% |
|   | 2020/21         | 93,84                                | 98,7% | 85,05                                  | 91,1% | 8,79                                       | 704,8%  |
| <i>Jaque (59,6 km<sup>2</sup>)</i>              | 2017/18         | 82,68                                | 99,0% | 38,42                                  | 54,6% | 44,26                                      | 335,0%  |
|   | 2018/19         | 106,07                               | 99,0% | 71,03                                  | 82,5% | 35,04                                      | 166,7%  |
|   | 2019/20         | 133,97                               | 98,5% | 50,33                                  | 46,1% | 83,64                                      | 312,9%  |
|   | 2020/21         | 182,27                               | 98,8% | 104,21                                 | 63,7% | 78,06                                      | 376,5%  |
| <i>Escrivânia – Gordura (96 km<sup>2</sup>)</i> | 2017/18         | 281,20                               | 98,7% | 241,16                                 | 87,4% | 40,04                                      | 443,1%  |
|   | 2018/19         | 294,55                               | 98,7% | 275,06                                 | 94,7% | 19,49                                      | 246,1%  |
|   | 2019/20         | 332,38                               | 98,4% | 289,78                                 | 87,3% | 42,61                                      | 713,3%  |
|   | 2020/21         | 358,18                               | 98,8% | 291,60                                 | 81,7% | 66,58                                      | 1171,6% |
| <i>Palmeira – Jaguará (156 km<sup>2</sup>)</i>  | 2017/18         | 286,65                               | 99,1% | 205,58                                 | 79,9% | 81,07                                      | 251,9%  |
|   | 2018/19         | 388,19                               | 98,5% | 302,64                                 | 80,7% | 85,55                                      | 456,8%  |
|   | 2019/20         | 312,80                               | 98,6% | 170,60                                 | 59,9% | 142,20                                     | 440,4%  |
|   | 2020/21         | 425,03                               | 96,0% | 242,51                                 | 59,7% | 182,52                                     | 504,2%  |

A suavização do escoamento total é evidenciada em todos os períodos e em todos os córregos, contudo, essa suavização corresponde a menos de 1,5% do volume total em média, e nunca é superior a 5%. Já o escoamento subterrâneo apresenta um média quase 30% menor que o primeiro método, e por isso observou-se uma supervalorização do escoamento superficial pela série de base mensal.

O método do filtro digital recursivo utilizou dados de área das bacias e vazão, da mesma forma que o método de deslocamento da curva de recessão. O método do filtro empregou um parâmetro de calibração de partida de 0,925, sendo que este pode ser aumentando em até 2% para regiões de pluviometria menores que 1100 mm e diminuído para regiões como pluviometrias maiores, como no caso da região de estudo. Desta forma, é possível garantir que os métodos puderam ser comparados entre si e que foram aplicados corretamente.

Pressupõe-se que a interpolação de dados mensais pelo método de filtro recurso suavizou a forma geral da curva, uma vez que foram utilizados, em média, trinta pontos a menos, representando apenas um valor diário de separação de escoamento, o que gerou valores um pouco menores de escoamento total. Apesar da diferença ser pequena, esse número menor de pontos suavizou o ângulo da curva de concentração e a curva de esgotamento, e, dessa forma, os valores do escoamento subterrâneo subestimou os valores de recarga (Tabela 3.6) e superestimou os valores de escoamento superficial.

Tabela 3.6 – Valores de recarga e taxa de recarga para as bacias estudadas obtidos por meio do método de Lyne e Hollick (1979) adaptado por Smakhtin (2001).

| Bacia   | Ano Hidrológico | Recarga (mm) | Pluviometria (mm) | Taxa Recarga (%) |
|---|-----------------|--------------|-------------------|------------------|
| <i>Flor (16 km<sup>2</sup>)</i>                 | 2017/18         | 6,23         | 1160,40           | 0,54%            |
|   | 2018/19         | 9,11         | 1142,00           | 0,80%            |
|   | 2019/20         | 9,60         | 1211,36           | 0,79%            |
|   | 2020/21         | 15,68        | 1135,01           | 1,38%            |
| <i>Palmeira (31 km<sup>2</sup>)</i>             | 2017/18         | 14,62        | 1268,69           | 1,15%            |
|   | 2018/19         | 12,27        | 1119,94           | 1,10%            |
|   | 2019/20         | 13,15        | 1384,20           | 0,95%            |
|   | 2020/21         | 16,33        | 1124,40           | 1,45%            |
| <i>Samambaia (48 km<sup>2</sup>)</i>            | 2017/18         | 128,85       | 1160,40           | 11,10%           |
|   | 2018/19         | 134,94       | 1142,00           | 11,82%           |
|   | 2019/20         | 135,58       | 1211,36           | 11,19%           |
|   | 2020/21         | 155,22       | 1135,01           | 13,68%           |
| <i>Jaque (59,6 km<sup>2</sup>)</i>              | 2017/18         | 57,04        | 1160,40           | 4,92%            |
|   | 2018/19         | 105,47       | 1142,00           | 9,24%            |
|   | 2019/20         | 74,73        | 1211,36           | 6,17%            |
|   | 2020/21         | 154,73       | 1135,01           | 13,63%           |
| <i>Escrivânia – Gordura (96 km<sup>2</sup>)</i> | 2017/18         | 220,06       | 1160,40           | 18,96%           |
|   | 2018/19         | 250,99       | 1142,00           | 21,98%           |
|   | 2019/20         | 264,42       | 1211,36           | 21,83%           |
|   | 2020/21         | 266,09       | 1135,01           | 23,44%           |
| <i>Palmeira – Jaguará (156 km<sup>2</sup>)</i>  | 2017/18         | 115,44       | 1160,40           | 9,95%            |
|   | 2018/19         | 169,94       | 1142,00           | 14,88%           |
|   | 2019/20         | 95,80        | 1211,36           | 7,91%            |
|   | 2020/21         | 136,18       | 1135,01           | 12,00%           |

O valor médio da recarga anual da área foi de 106,77 mm (9,20 % da pluviometria). Os valores médios de recarga do quadriênio das bacias reduziram em relação ao método da curva de recessão. A bacia do Flor reduziu de 1,55% para 0,88%; bacia do Palmeira de 1,63% para 1,16%; bacia do Samambaia de 14,88% para 11,95%; bacia do Jaque de 15,21% para 8,49%; bacia do Escrivânia–Gordura de 28,43% para 21,55%, e para bacia do Palmeira–Jaguara de

18,42% para 11,18%. Apesar da diminuição, quando analisados os valores obtidos nos quatro anos hidrológicos, a redução geral das recargas foi amenizada. Portanto, entende-se que a aplicação do método automatizado em séries mensais, apesar de subestimar a recarga, quando aplicado em períodos de longo tempo, se aproxima mais dos valores reais. Contudo, o método deve ser usado apenas quando os dados diários não estão disponíveis e quando há series relativamente longas, sabendo-se que os dados de recarga ficarão subestimados e o escoamento superficial superestimados.

#### 6.4 Cálculo de Recarga pelo Método de Variação do Nível d'Água (VNA)

Os resultados dos cálculos de recarga pelo método VNA foram sintetizados na Tabela 3.7, que contém também a relação das unidades aquíferas interceptadas pelos poços tubulares, definidos a partir da perfilagem ótica de todos os poços. A aplicação do método em 13 poços distribuídos na região teve como objetivo realizar uma setorização da recarga com relação principalmente à unidade hidrogeológica interceptada, valendo-se da característica do método que resulta em valores mais setorizados de recarga. O gráfico da Figura 13 contém um exemplo de aplicação do método VNA no poço 00681-2004 durante o período chuvoso do ano hidrológico de 2018/2019.

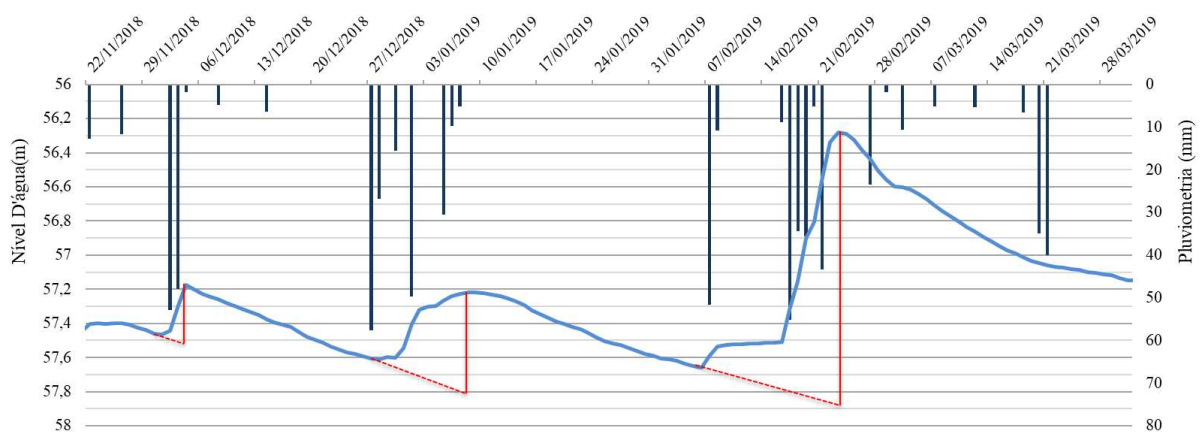


Figura 3.11 – Exemplo de aplicação do método VNA em eventos específicos de chuva que acarretou na variação do nível d'água do poço 00681-2004 durante o período chuvoso do ano hidrológico de 2018/2019. As retas tracejadas de vermelho são o prolongamento das curvas de recessão, e foram utilizadas para definir a variação entre o maior e menor nível d'água registrado antes e depois dos eventos de chuva.

O resultado geral do cálculo de recarga por unidade aquífera de todos os anos hidrológicos estimou uma recarga média de 11,24% para o aquífero cárstico, relacionado às rochas calcáreas do Mb. Lagoa Santa (Tabela 3.7). Esse valor foi um pouco mais alto que a média calculada para as demais unidades, contudo apresentou maior variância entre os valores



calculados, e corrobora a elevada anisotropia do meio, com mecanismos da recarga mais complexos através de condutos e das fissuras alargadas pela dissolução.

Tabela 3.7 – Tabela contendo o resultado do valor médio de recarga por meio do método de Variação do Nível d'água (VNA) em cada poço observado, segundo a unidade hidrogeológica associada.

| Unidade Hidrogeológica     | Poço Tubular      | Recarga média (%)<br>2018/19 | Recarga média (%)<br>2019/20 | Recarga média (%)<br>2020/21 |
|----------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Aquífero Cárstico          | <i>03056-PT</i>   | 3,44                         | 4,21                         | 4,78                         |
|                            | <i>17613-PT</i>   | 17,74                        | -                            | -                            |
|                            | <i>C-02-ALS</i>   | 24,21                        | 20,73                        | 20,75                        |
|                            | <i>N10</i>        | 15,85                        | 13,94                        | 13,86                        |
|                            | <i>N6162</i>      | 1,38                         | 2,68                         | 2,52                         |
| Aquífero Cárstico-fissural | <i>00681-2003</i> | 3,12                         | 13,20                        | -                            |
|                            | <i>E-06-ACB</i>   | 6,22                         | 6,17                         | 2,00                         |
|                            | <i>HPI</i>        | -                            | 0,81                         | 1,21                         |
|                            | <i>N39</i>        | 4,18                         | 2,67                         | 15,32                        |
|                            | <i>N63</i>        | 1,51                         | 5,38                         | 5,38                         |
| Aquífero Fissural          | <i>P5</i>         | 11,01                        | 12,22                        | 8,01                         |
|                            | <i>C-01-PP</i>    | 6,47                         | 7,79                         | 13,60                        |
|                            | <i>C-03-CP</i>    | 10,02                        | 10,16                        | 15,11                        |

Em relação aos poços localizados no contexto da unidade cárstica-fissural, relacionada às rochas do Mb. Pedro Leopoldo, os valores de recarga tiveram a menor média de valores (6,15%) entre as unidades, porém, sua variância foi menor em relação aos poços da unidade aquífera cárstica, já que esse sistema apresenta condutividade apenas secundária (por fissuras), e é menos anisotrópica que o sistema cárstico.

Já os poços da unidade fissural, relacionada às rochas do embasamento cristalino do complexo Belo Horizonte, apresentou uma recarga média de 10,53% e a menor variância entre as unidades, porém bem próxima da unidade cárstico-fissural, o que pode indicar similaridades de comportamento entre essas duas unidades. Porém, deve-se ressaltar que há uma baixa amostragem de pontos (apenas dois poços), o que dificulta uma correlação mais assertiva entre as outras unidades.

De maneira geral, percebe-se que os valores de recarga entre as três unidades ficaram com uma média de valores muito próximas entre si, sendo que a unidade cárstica apresentou taxas um pouco maiores, porém, com uma maior variância entre valores. A análise individual da taxa de recarga por ano hidrológico não marcou nenhuma relação clara de aumento ou diminuição da recarga por período (Tabela 3.7), o que indica que esse método é mais sensível à análise de eventos de chuva pontuais.

Os menores valores médios de recarga estão distribuídos principalmente mediante a presença da Formação Serra de Santa Helena (Figura 3.12), ou seja, nas porções nordeste e sudeste, e atesta o fato de haver maior dificuldade de recarga para o aquífero através da presença de coberturas espessas de material argiloso.



Os maiores valores de recarga estão distribuídos no contato entre os Mb. Pedro Leopoldo e Lagoa Santa (região centro-leste do mapa) e no contato entre o embasamento cristalino e os dois membros de rochas calcáreas (região sudoeste do mapa). Isso pode indicar que essas zonas de contato litológicas são de fato estruturalmente mais desenvolvidas, que facilitam a passagem e, conseqüentemente, a recarga e descarga de água subterrânea. Ressalta-se que o mapa indica apenas a geologia superficial da área, mas as unidades hidrogeológicas de cada poço foram definidas conforme seu perfil geológico e perfilagem ótica. Ao considerar a média geral dos três anos hidrológicos de todos os poços, a taxa de recarga foi de 9,31%.

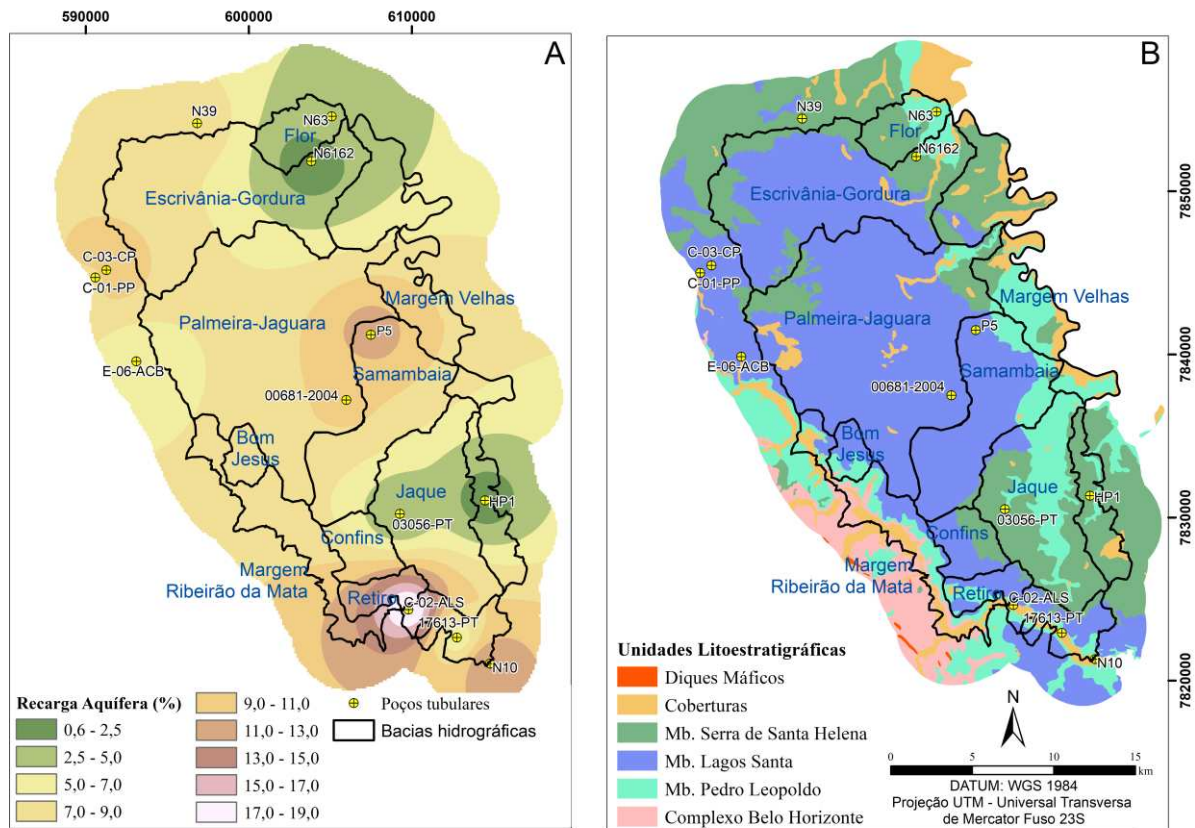


Figura 3.12 – Mapas analisados conjuntamente visando correlacionar as zonas de maior e menor índice de recarga com as características de cada litotipo: A) Valores médios de recarga e B) Mapa geológico da área.

De maneira geral, este método obteve valores de recarga muito similares aos outros dois utilizados neste trabalho, e se mostrou um método muito útil para setorização de recarga por bacia hidrogeológica, o que permitiu fazer análises mais pontuais e indicar zonas de recarga mais altas e áreas do aquífero mais vulneráveis à exploração de água, tornando-se também uma ferramenta útil para uma melhor gestão ambiental.

## 7 CONCLUSÕES

Para o estudo da dinâmica de recarga da área, foram aplicados três métodos de estimativa de recarga. O método de deslocamento da curva de recessão de Rorabaugh (1964) retornou um valor médio de recarga das bacias de 13,35% da pluviometria. Constatou-se uma alta correlação das águas subterrâneas para o sistema, em especial às bacias carbonáticas (Palmeira, Palmeira-Jaguara, Escrivânia-Gordura e Samambaia). Já as bacias do córrego Flor e Jaque, mais influenciados pelas rochas metapelíticas, apresentaram uma descarga mais lenta e índices de fluxo de base menores. As bacias carbonáticas também obtiveram maiores valores de produtividade, enquanto a alta produtividade da bacia do Jaque é fruto da existência de contribuições subterrâneas dos sistemas carbonáticos fechados localizados a oeste.

A relação entre o escoamento total obtido por meio da análise dos hidrogramas das bacias com o excedente hídrico obtido por meio do balanço hidroclimatológico de Thorntwaite e Matter (1955) indicou a ocorrência de captações de águas superficiais e subterrâneas na área de estudo, o que pode acarretar em valores de recarga subestimados.

O segundo método aplicado utilizou o parâmetro de filtro digital recursivo desenvolvido por Lyne e Hollick (1979) e adaptado e automatizado por Smakhtin (2001) para séries de vazões mensais. A partir dos hidrogramas obtidos, foi possível perceber uma suavização dos máximos e mínimos ao comparar com o método anteriormente aplicado. O parâmetro de filtro utilizado foi de 0,925 e a média da recarga resultante do método foi de 9,20%. Dessa maneira, apesar de se esperar uma suavização dos valores de recarga, ao se analisar os resultados em um período longo de monitoramento, as reduções dos valores de taxa de recarga foram amenizadas. Porém, há de se ressaltar que esse método, por utilizar dados mensais, subestima as taxas de recarga e escoamento de base e, por isso, superestima o escoamento superficial, tendo que ser utilizado com ressalvas para cursos de água de baixa vazão e/ou curtos períodos temporais.

Por fim, o método de variação de nível d'água (VNA), de Healy e Cook (2002) retornou um valor médio de recarga, a partir da aplicação em 13 poços, de 9,31%, muito similar às médias encontradas nos outros dois métodos. O maior índice de recarga foi constatado na unidade cárstica, e foi a unidade que exibiu maior variação das taxas de recarga entre os poços, o que corrobora com o fato de ser um aquífero mais anisotrópico. A interpolação das médias de recarga e a comparação com a distribuição geológica da área indicou uma correlação das zonas de menor taxa de recarga com a presença das rochas metapelíticas da Formação Serra de Santa Helena, e taxas de recarga mais altas entre as rochas do Membro Lagoa Santa, e no contato entre as rochas carbonáticas dos Membro Pedro Leopoldo e Lagoa Santa com o embasamento

cristalino do Complexo Belo Horizonte, ou seja, locais onde apresentam feições e estruturas que facilitam a circulação de água.

De maneira geral, todos os métodos utilizados obtiveram valores similares e coerentes com estimativas de recarga de outros trabalhos, como o de De Paula (2019), que calculou uma taxa média de recarga para a área de 12%. Entre os métodos aplicados a partir da análise de hidrogramas, o método de Rorabaugh (1964) apresentou resultados mais refinados, já que usa como dados primários a vazão diária de cursos d'água, enquanto o método de Lyne e Hollick (1979) adaptado por Smakhtin (2001) foi aplicado utilizando-se dados de vazão mensais, e, por isso, deve-se priorizar sua utilização apenas na falta de monitoramento diário.

Apesar da boa aderência entre os métodos, os resultados obtidos em todos eles possivelmente apresentam-se subestimados, devido principalmente às elevadas saídas de água por bombeamento. É recomendado ainda a correlação de informações relativas ao litotipo, geomorfologia do carste e seus processos de dissolução. Por fim, recomenda-se sempre a aplicação de mais de um método para possibilitar a comparação e indicação dos mais indicados para cada tipo de estudo em particular. Métodos como balanço de cloreto são interessantes para se avaliar a relação entre a água pluvial e subterrânea; estudos envolvendo isótopos podem ser úteis para uma melhor definição de zonas de recarga, e análises com traçadores podem ser aplicados para indicação de recargas alóctones e conexões entre água superficial e subterrânea.

## 8 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.C.L.S.; CHAVES, H.M.L. Estimativa de recarga da bacia do Rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 1123-1129. 2011.

ALKMIM, F. F.; NEVES, B. B. B.; ALVES, J. A. C. Arcabouço Tectônico do Cráton do São Francisco—Uma Revisão. O Cráton do São Francisco. **II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, Salvador, Bahia**. 1993.

ALMEIDA J.C.D.; HERNANDEZ, F.B.T.; FRANCO, R.A.M.; ZACOLER J. L. Medição de velocidade e vazão em cursos d'água: molinete hidrométrico versus método do flutuador. Universidade Estadual de São Paula, Unesp. **Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos**. 2010.

AMARAL, D.G.P. **Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG)**. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 154p. 2018.

ANA, Agência Nacional de Águas – **Sistema HIDROWEB**, 2022. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 10 mai. 2022.

ANDERSON, M.A.; WOESSNER, W.W. **Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport**. Academic Press. Inc.: California (USA). 381p. 1992.

ANDRADE, I.B., AMORIM, J.B. **Mapeamento geológico com ênfase na relação hidráulica entre o complexo granítico-gnáissico com o grupo Bambuí**. Trabalho de Graduação – Universidade Federal de Minas Gerais, 105p. 2018.

ANDREO B.; VÍAS J.; LÓPEZ-GETA J.A.; CARRASCO F.; DURÁN J.J.; JIMÉNEZ P. Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. **Boletín geológico y minero**, 115(2), 177-186. 2004.

ANDREO, B.; VÍAS, J.; DURÁN, J.J.; JIMÉNEZ, P.; GETA-LÓPEZ, J. A.; CARRASCO, F. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. **Hydrogeology Journal**. 16: 911. 2008.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 35(2), 411-424. 1999.

AULER, A.S. **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil**. Msc Thesis, Department Of Geography And Geology, Western Kentucky University, Bowling Green,.110 f. 1994.

BALBIN-BETANCUR, S. **Contribuição do fluxo de base na vazão de rios em áreas tropicais com alto índice pluviométrico: uma análise para a bacia do rio Atrato, Colômbia**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Meio Ambiente – IGCE, Universidade Estadual de São Paulo, 146p. 2019.

BARBOSA, G.V. Notícia sobre o karst na mata de Pains. **Boletim Mineiro de Geografia**, Belo Horizonte, n. 2 e 3, 3-21. 1961.

BARLOW, P.M.; CUNNINGHAM, W.L; ZHAI, T.; GRAY, M. **U.S. Geological Survey Groundwater Toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0)—User guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data**. US Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. B10, 27 p. 2015.

BATISTA, R.C.B. **Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 127 p. 2009.

BERBERT-BORN, M.L.C. **Geoquímica dos Sedimentos Superficiais da Região Cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG), e os indícios de Interferências Antrópicas**. DEGEO/UFOP. Dissertação de Mestrado. 1998.

BORTOLIN, T.A.; REGINATO, P.A.R.; PRESOTTO, M.A.; SCHNEIDER, V.E. Estimativas de recarga aquífera com uso de filtros digitais em sub-bacias hidrográficas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul. **Scientia Cum Industria**. Caxias do Sul: UCS. Vol. 6, n. 2, p. 21-30. 2018.

CANIE - **Cadastro nacional de informações espeleológicas**, 2019. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>. Acesso em: 12 jan. 2023.

CARDOSO, F. A. **Natural background levels of inorganic elements in the groundwaters of the Lagoa Santa Karst Region, Minas Gerais, Brazil**. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 89p. 2019.

CARNEIRO, F.A. **Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 338 p. 2013.

CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas**. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>. Acesso em: 01 mai. 2023.

CHEN, W.; LEE, C. Estimating ground-water recharge from steamflow records. **Environmental Geology**, v.44, p.257-265. 2003.

CUNHA, V.C.V.; MOURÃO, M.A.A.; COTA, S.D.S. Aplicação do método da flutuação do nível d'água subterrânea para estimativa de recarga no Aquífero Urucuia-São Desidério-BA. **Águas Subterrâneas**. 2016.

DANTAS, J.C.M. **Compartimentação e modelagem hidrogeológica do Sistema aquífero cárstico-fissural da região cárstica de Lagoa Santa**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 71p. 2023.

DE PAULA, R.S. **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste Lagoa Santa, MG**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 279p. 2019.

DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, 33(2), 119-133. 2019.

DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Method to complete flow rate data in automatic fluviometric stations in the karst system of Lagoa Santa area, MG, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**. 2020.

DE SOUZA, R.T. **Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido**. Tese de doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, P. 223. 2020.

DELIN, G.N., HEALY, R.W., LORENZ, D.L., NIMMO, J.R. Comparison of local-to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. **Journal of Hydrology**, 334(1-2), 231-249. 2007.

DELPOMDOR, F.R.; ILAMBWETSI, A.M.; CAXITO, F.A.; PEDROSA-SOARES, A.C. New interpretation of the basal Bambuí Group, Sete Lagoas High (Minas Gerais, E Brazil) by sedimentological studies and regional implications for the aftermath of the Marinoan glaciation: Correlations across Brazil and Central Africa. **Geologica Belgica**. 2020.

FARFÁN, H.; CORVEA, J. L.; DE BUSTAMANTE, I. Sensitivity analysis of APLIS method to compute spatial variability of karst aquifers recharge at the National Park of Viñales (Cuba). **Advances in research in karst Media**, 19-24. 2010.

FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. **Karst Geomorphology and Hydrology (Vol. 601)**. Unwin Hyman, London, 601p. 1989.

GALVÃO P.; HIRATA R.; CONICELLI B. Estimating groundwater recharge using GIS based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 77(10): 398. 2018.

GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. **Journal of Hydrology**, 532, 149-162. 2016.

GALVÃO, P.H.F. **Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2015.

GOMES, R.M.D.A. **Modelo hidrogeológico conceitual e análise da favorabilidade hidrogeológica do aquífero cárstico na região urbana de Sete Lagoas–MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 113p. 2020.

HEALY, R.W.; COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology journal**, 10(1), 91-109. 2002.

HESS, J.W.; WHITE, W.B. Groundwater geochemistry of the carbonate karst aquifer, southcentral Kentucky, USA. **Applied geochemistry**, 8(2), 189-204. 1993.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Comitês, Portal – Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas**. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-sf5>. Acesso em: 14 ago. 2022.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Meteorológicos**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em 5 mai. 2022.

KARFUNKEL J.; HOPPE, A. Late Proterozoic glaciation in central-eastern Brazil: synthesis and model. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. 65:1-21. 1988.

KOHLER, H. C. **Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa**. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo. 1989.

KOHLER, H.C. A Evolução Morfogenética da Lagoa Santa - MG. **Anais 30° Congresso Brasileiro de Geologia**, Recife, 1, 147-153. 1978.

KÖPPEN, W.G., Geiger R. **Klimate der Erde**. Gotha Verlagcondicionadas, Justus Perthes. 1928.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Departamento de Geologia Aplicada – IGCE. Rio Claro: UNESP, 20p. 2000.

LIMA, F.M.F., FONSECA F.H., MATINAGA L.K. **Geologia e hidrogeologia da Bacia Gordura-Escrivânia – MG**. Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 144p. 2016.

LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. **Hydrology for engineers**. New York, McGraw-Hill. 508 p. 1982.

LUCAS, M.C., WENDLAND, E.C. Estimativa de recarga subterrânea a partir de análise da curva de recessão do escoamento de base. **Anais**. 2011.

LYNE, V., HOLLICK, M. Stochastic Time-Variable Rainfall-Runoff Modeling. Institute of Engineers Australia National Conference, Org. Institute of Engineers **Australia National Conference**, p. 89– 93. 1979.

MAGALHÃES C.C.C.; SILVA T.G.A. **Mapeamento hidroestratigráfico dos aquíferos cársticos nos municípios de Matozinhos e Pedro Leopoldo, MG**. Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 96p. 2018.

MARTINS-NETO M.A.; PEDROSA-SOARES A.C.; LIMA S.A.A. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basis from Late Paleoproterozóico to Late Neoproterozóico in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. **Sedimentary Geology**, 141-142: 343-370. 2001.

MENESES, I.C.R.R.C. **Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 187 f. 2003.

MOURÃO, M.A.A.; CRUZ W.B.; GONÇALVES, R.LF. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. **In: Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais**. Belo Horizonte, 327 – 349. 2001.

NATHAN, R.J.; MCMAHON, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water resources research**, 26(7), 1465-1473. 1990.

PACHECO, W.M.N. **Comportamento hidrodinâmico das lagoas da região da APA Carste de Lagoa Santa**. Tese de doutorado. Instituto de Geociências – UFMG. Belo Horizonte, MG. 2023. No prelo.

PEREIRA, S.I. **Modelagem hidrogeológica numérica aplicada à avaliação de cenários de uso de água**. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 127p. 2022.

PESSOA, P.F.P. **Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG**. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 375 p. 2005.

PILÓ, L.B. **A morfologia cárstica do baixo curso do rio Peruaçu, Januária-Itacarambi, MG**. Instituto de Geociências da UFMG, Belo Horizonte. Monografia de Graduação, 80 p. 1989.

PILÓ, L.B. Geomorfologia Cárstica - Revisão de Literatura. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 1, 1, 88-102. 2000.

PILÓ, L.B.; CASTRO, S.S. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú-Carste de Lagoa Santa, MG.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1998.

RIBEIRO, C.G. **Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos  $2h$ ,  $18o$  e  $3h$  na região de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. Belo Horizonte, 269p. 2020.

RIBEIRO, C.G., MEIRELES, C.G., LOPES, N.H.B., ARCOS, R.E.C. **Levantamento Geológico estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Trabalho Geológico de Graduação. 2016.

RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FILHO, A.D.; PADILHA, AV.; CÓRDOBA, C.V. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – **Relatório final CPRM**, 2ª ed, escala 1:50.000. 2003.

RISSER, D.W.; GBUREK, W.J.; FOLMAR, G.J. **Comparison of methods for estimating ground-water recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States.** Vol. 5038, US Department of the Interior, US Geological Survey. 2005.

ROLIM, G.S; SENTELHAS, P.C; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Rev. Bras. Agrometeorol**, 6, 133-137. 1998.

RORABAUGH, M.I. **Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow.** International Association of Scientific Hydrology Publication 63, 432–441. 1964.

RUHL, J.F.; KANIVETSKY, R.; SHMAGIN, B.A. **Estimates of recharge to unconfined aquifers and leakage to confined aquifers in the seven-county metropolitan area of Minneapolis-St. Paul, Minnesota** (No. 2). US Department of the Interior, US Geological Survey. 2002.

RUTLEDGE, A.T. **Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records - Update.** US Department of the Interior, US Geological Survey. 1998.

RUTLEDGE, A.T.; DANIEL III, C.C. Testing an automated method to estimate ground-water recharge from streamflow records. **Groundwater**, 32(2), 180–189. 1994.

RUTLEDGE, A.T.; MESKO, T.O. Estimated hydrologic characteristics of shallow aquifer systems in the Valley and Ridge, the Blue Ridge, and the Piedmont physiographic provinces based on analysis of streamflow recession and base flow (No. 1422-B, pp. B1-B58). **US Geological Survey**. 1996.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M. V. B; BUBA, H.; KISHI R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria Aplicada.** Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, PR. LACTEC. ISBN 85-88519-01-1. 2001.



SCANLON, B.R., HEALY, R.W., COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology journal**, 10(1), 18-39. 2002.

SILVA, J.C.S. **Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG**. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), 303 p. 2003.

SILVA, T.G.A. **Análise da aplicação de métodos europeus de vulnerabilidade intrínseca ao carste tropical da região da APA Carste de Lagoa Santa**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 84p. 2022.

SMAKHTIN, V.U. Estimating continuous monthly baseflow time series and their possible applications in the context of the ecological reserve. **Water Sa**, 27(2), 213-218. 2001.

SMAKHTIN, V.Y. Regional low-flow studies in South Africa. **IAHS PUBLICATION**, 125-132. 1997.

SOARES, L.C. **Estimativa da recarga aquífera na Bacia do Rio Riachão, MG**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 176p. 2012.

SOUZA, R.T. **Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido**. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2020.

TAPIA, N. **Aplicación de metodologías para la estimación espacial de recarga y conductividad hidráulica**. Caso de los andes centrales en Perú. Universidad de Málaga. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/444778842/Metodologia-APLIS-Peru>. 2011.

TEIXEIRA, G.M.; DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; PACHECO, W.N.; ANDRADE, I.B. Evaluation of Aquifer Recharge Methods Applied to Fissure and Karst Aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil. **Hydrological Process**. 2023. No prelo.

TEIXEIRA, G.M.; PENA, M.A.C.; SILVA, P.H.P. **Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Trabalho de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2020.

TEODORO M.I.P.; VELÁSQUEZ L.N.M.; FLEMING P.M.; DE PAULA R.S.; SOUZA R.T.; DOI B.B. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de Traçadores Corantes, na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, 33(4):392-406. 2019.

THIESSEN, A.H. **Precipitation Averages for Large Areas**. Monthly Weather Review, 39, 1082-1089. 1911.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, 38(1), 55-94. 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TRICART, J. O Karst das vizinhanças setentrionais de Belo Horizonte (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, 4, 3-20. 1956.

UFV - CETEC - UFLA - FEAM. 2010. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acesso em: 27 out. 2022.

UHLEIN A.; TROMPETTE R.R.; ALVARENGA C.J.S. Neoproterozoic glacial and gravitational sedimentation on a continental rifted margin: The Jequitaí-macaúbas sequence. Minas Gerais, Brazil. **J South Am. Earth Sci**, 12: 435-451. 1999.

USGS Groundwater Information – **Recession curve, case studies**. Disponível em: [https://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/recession\\_curve/case\\_studies.html](https://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/recession_curve/case_studies.html). Acesso em: 13 set. 2022.

VARNI, M.; COMAS, R.; WEINZETTEL, P.; DIETRICH, S. Application of the water table fluctuation method to characterize groundwater recharge in the Pampa plain, Argentina. **Hydrological Sciences Journal**, 58(7), 1445-1455. 2013.

VELÁSQUEZ, L.N.M.; ANDRADE, I.B.; RIBEIRO, C.G.; AMARAL, D.G.P.; VIEIRA, L.C.M.; CARDOSO, F.A.; PAULA, R.S.; SILVA, P.H.P.; SOUZA, R.T.; ALMEIDA, S.B.S. **Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Relatório parcial, PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317 / Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco. 2018.

VIANA, H.S.; KOHLER, H.C.; TAVARES, V.P. (Org.). **APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico**. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 301p. 1998.

VIEIRA, L.C.M. **Características da Geologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 99p. 2015.

VIEIRA, L.C.M. **Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 111p. 2018.

WHITE, W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions. **Engineering Geology**, v. 65, p. 85-105. 2002.

#### **4 ESTIMATIVA DE RECARGA AQUÍFERA PELO MÉTODO APLIS ADAPTADO ÀS CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS FISSURAIS E CÁRSTICOS DA REGIÃO DA APA CARSTE DE LAGOAS SANTA, MG**

##### **RESUMO**

Este trabalho apresenta a análise das taxas de recarga estimadas a partir do método APLIS adaptado para as condições do carste da Área de Preservação Ambiental (APA) de Lagoa Santa e arredores, que abrigam importantes aquíferos cársticos e fissurais responsáveis pelo abastecimento urbano, rural e industrial da região. A área de estudo se localiza a norte de Belo Horizonte, Minas Gerais, e está inserida no contexto das rochas carbonáticas e siliciclásticas neoproterozoicas do Grupo Bambuí. A APA é palco de importantes descobertas paleontológicas e arqueológicas e ainda hospeda uma grande riqueza faunística e florística. Dessa forma, é essencial que se assegure a preservação de seus patrimônios e dos recursos hídricos da área e, para tanto, é fundamental se estudar a parcela de água responsável pela reposição de água subterrânea para o sistema. O trabalho pretende, dessa forma, realizar essa estimativa da recarga através da adaptação do método APLIS, originalmente concebido no carste de clima temperado do sul da Espanha, que utiliza da análise paramétrica das características físicas, geológicas, geomorfológicas e pedológicas para se criar um índice embasado para a classificação espacial da recarga. Para sua aplicação no carste de clima tropical, foram realizadas diversas adaptações nas classificações paramétricas e no grau de relevância definido para cada parâmetro. A calibração dos resultados se embasou nas estimativas de recarga anteriormente realizadas utilizando métodos diretos de quantificação. Os resultados obtidos foram satisfatórios, e indicaram taxas de recarga condizentes com a realidade do ambiente estudado. As regiões com alta cobertura de solo apresentaram recargas muito baixas, e foi possível dimensionar melhor as taxas de recarga específicas nas depressões cársticas e em áreas de maciços rochosos. A comparação das taxas obtidas para cada bacia hidrográfica pelo APLIS e pelos métodos de estimativa de recarga utilizando separação de escoamentos indicou que o método APLIS adaptado apresenta alta confiabilidade para ser aplicado em bacias hidrográficas onde não apresenta rede de monitoramento de suas descargas, sendo, portanto, uma ferramenta poderosa para gestão por parte de órgão públicos, e também para estudos científicos ou de projetos de setores privados.

Palavras-chave: recarga; APA Carste de Lagoa Santa; APLIS.

## ABSTRACT

This study presents the analysis of recharge rates estimated using the adapted APLIS method for the karst conditions of the Lagoa Santa karst Environmental Protection Area (EPA) and its surroundings, which has important karst and fissure aquifers that provide water supply for urban, rural, and industrial areas in the region. The study area is located north of Belo Horizonte and is part of the Neoproterozoic carbonate and siliciclastic rocks of the Bambuí Group. The EPA is known for its significant paleontological and archaeological discoveries and hosts a rich diversity of fauna and flora. Therefore, it is essential to ensure the preservation of its heritage and water resources, and to do so, it is crucial to understand the portion of water responsible for replenishing groundwater in the system. This study aims to estimate recharge by adapting the APLIS method, which was originally developed for the karst of the temperate climate in southern Spain. The APLIS method uses a parametric analysis of physical, geological, geomorphological, and pedological characteristics to create an index for classifying recharge. To apply this method in the tropical karst environment, several adaptations were made to the parametric classifications and the relevance level defined for each parameter. The calibration of the results was based on previous recharge estimates obtained using direct quantification methods. The obtained results were satisfactory, indicating recharge rates consistent with the reality of the studied environment. Regions with high soil coverage showed very low recharge rates, while it was possible to better estimate specific recharge rates in karst depressions and rocky massifs. The comparison of the rates obtained for each watershed using the APLIS method and other recharge estimation methods based on flow separation indicated that the adapted APLIS method is highly reliable when applied in watersheds without discharge monitoring networks. Therefore, it serves as a powerful tool for management by public agencies and for scientific studies or projects in the private sector.

Keywords: recharge; Lagoa Santa Karst EPA; APLIS.

## 1 INTRODUÇÃO

A região alvo desta pesquisa é coberta pelas rochas pelíticas e carbonáticas do Grupo Bambuí. É também onde situa-se a Área de Preservação Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, que abarca mais de 80% da região estudada. A APA foi criada em 1990 pelo Decreto no 98.881, de 25 de janeiro de 1990. Dentre as garantias estabelecidas neste decreto está a conservação do conjunto paisagístico, a proteção dos sítios arqueo-paleontológicos, da cobertura vegetal, da fauna e dos recursos hídricos. Fica evidente a importância desta região como patrimônio espeleológico e ambiental do Brasil. Ela possui configuração típica do ambiente do carste, com a formação de cavidades naturais e uma complexa rede de conexões subterrâneas constituída por sistemas de condutos, cavernas e fraturas por onde percola o fluxo da água em subsuperfície e em meio subterrâneo.

Apesar de sua importância ambiental, cultural e científica, a região tem registrado impacto do aumento da urbanização, da agropecuária, da indústria e da mineração do calcário, a partir da maior impermeabilização do solo e da superexploração de água por poços tubulares na área.

A região estudada faz parte da borda sudeste da Bacia Intracratônica do São Francisco e, segundo Ribeiro *et al.* (2003), sofreu eventos deformacionais pós-deposicionais, tanto distensivos quanto compressivos. Estes eventos formaram estruturas de falhas, fraturas, veios, lineações e dobras por onde se criou rotas mais favoráveis à percolação de água, e facilitou a dissolução dos carbonatos para a formação dos aquíferos cárstico e/ou cárstico-fissural. Nestes tipos de sistemas hídricos, a recarga aquífera pode ocorrer de diversas formas: proveniente da água externa ao sistema, da infiltração difusa nos solos, dos aquíferos suspensos dos horizontes de solo, e também da recarga direta através das feições superficiais como dolinas, vales secos, sumidouros, maciços, lapiás, entre outras estruturas.

Diante dos problemas enfrentados na região, é crucial que seja realizada a caracterização e a quantificação das zonas de recarga, principalmente em se tratando de ambientes carbonáticos com sistemas aquíferos complexos.

Este trabalho tem por finalidade principal a estimativa indireta de recarga aquífera através da adaptação do método APLIS (ANDREO *et al.*, 2004; 2008). Este método utiliza como base a classificação de cinco parâmetros físicos que são influenciadores da recarga, são eles: altitude, declividade, litologia, feições de infiltrações referencial e o tipo de solo.

O método foi desenvolvido para ser aplicado nos aquíferos carbonáticos da Europa meridional, porém, adaptações foram realizadas para sua aplicação em aquíferos carbonáticos

de clima tropical, com destaque para os trabalhos de Farfán, Corvea e De Bustamante (2010) em Cuba; de Tápia (2011) no Andes Centrais; de Soares (2012) no aquífero carbonático da região próxima à Montes Claros, e de Gomes (2020) aplicado à região foco de Sete Lagoas, a norte da área de estudo.

Para a aplicação na região de estudo, foram realizadas adaptações em relação à classificação dos parâmetros e o peso que cada parâmetro apresenta para as características específicas da área. A importância da validação de um método indireto é devido à facilidade de aplicação, sendo uma importante ferramenta para órgãos gestores, acadêmicos e iniciativas privadas para se estudar regiões onde não há sistema de monitoramento implementado, ou de difícil implementação.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho visou a aplicação do método APLIS para os aquíferos carbonáticos na região da APA Carste de Lagoa Santa. Para tal, foram realizadas adaptações nas classificações e pesos definidos para cada parâmetros analisados. A partir de sua aplicação, a recarga calculada foi comparada com os valores obtidos através de estimativas diretas para o cálculo da recarga previamente calculadas para a mesma região estudada. Por fim, pretendeu-se ainda fazer a comparação dos resultados obtidos nas áreas de maciços rochosos com as áreas de cobertura de solo e com depressões cársticas, além de comparar os resultados separados por bacias e por tipo de litologia na área.

## **2 CONTEXTUALIZAÇÃO FÍSICA**

A área foco deste estudo está inserida a norte de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, Brasil. A área de abrangência do território estudado é de 504 km<sup>2</sup> e os principais delimitadores físicos da área são o rio das Velhas a nordeste e o ribeirão da Mata a sudoeste. As demais drenagens secundárias e estradas de acesso delimitam a área nas porções sul e norte (Figura 4.1). A APA Carste de Lagoa Santa está totalmente inserida na região.

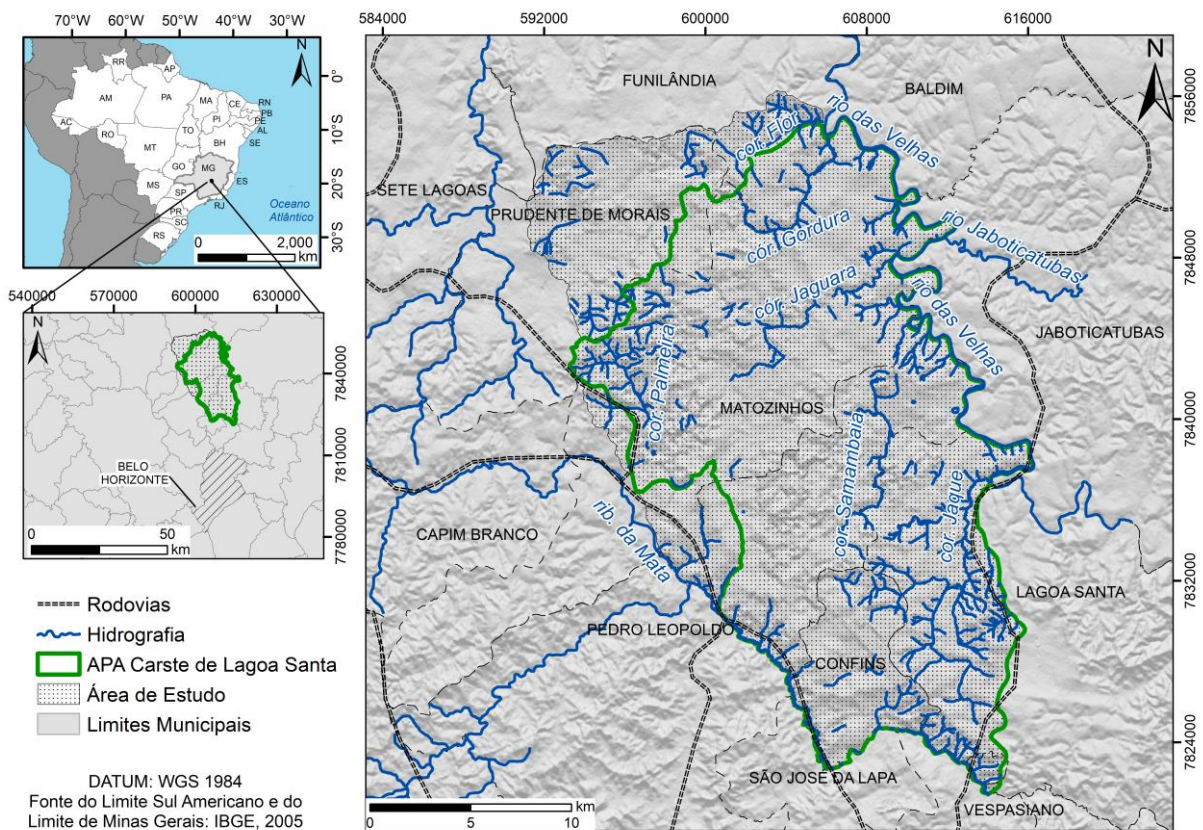


Figura 4.1 – Localização da área de estudo, com indicação do estado de Minas Gerais e de sua capital, e detalhe para os municípios, hidrografia e rodovias de acesso, além da área de estudo e da APA Carste de Lagoa Santa.

## 2.1 Hidrografia

Regionalmente, a área estudada está contida na Bacia hidrográfica federal do rio São Francisco, que percorre os Estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco e Alagoas. Em nível estadual, a área está inteiramente contida na bacia do rio das Velhas, que engloba 51 municípios de Minas Gerais (IGAM, 2021). Localmente, as sub-bacias que constituem a região são as do Flor, Escrivânia-Gordura, Palmeira-Jaguara, Palmeira, Margem Velhas, Samambaia, Bom Jardim, Margem Ribeirão da Mata, Confins, Retiro e Jaque. No geral, a área apresenta baixa densidade de drenagens superficiais, e há predominância das conexões hidráulicas subterrâneas, típico deste ambiente cárstico.

O nível de base principal da área é o rio das Velhas, e todas as bacias apresentam descarga direta para ele, com exceção dos córregos Samambaia, Retiro e Palmeira, que apresentam descarga indireta (DE PAULA, 2019). O córrego Samambaia apresenta descarga desconhecida até o momento, já o córrego Palmeira deságua no córrego Jaguara através de uma ressurgência, formando a bacia hidrogeológica Palmeira-Jaguara. A bacia do Retiro, por sua vez, deságua primeiro do ribeirão da Mata, que posteriormente descarrega no rio das Velhas.

A bacia do Gordura e do Escrivânia também formam juntos a bacia hidrogeológica Escrivânia-Gordura por conta de suas conexões de fluxo. Isso porque a única nascente conhecida na bacia do Escrivânia imerge em um sumidouro e emerge na bacia do Gordura, formando assim o compartimento denominado Escrivânia-Gordura (VELÁSQUEZ *et al.*, 2018).

As bacias dos córregos Samambaia, Escrivânia-Gordura, Palmeira e Palmeira-Jaguara são predominantemente carbonáticas, já que a maior parte de suas áreas estão sobre as rochas carbonáticas e apresentam diversas feições e depressões típicas do carste. Além disso, suas dinâmicas de fluxo e o comportamento dos seus hidrogramas e as produtividades calculadas são típicos de bacias carbonáticas.

As bacias do Jaque e Flor, por sua vez, apresentam caráter misto, já que sofrem influência das unidades metapelíticas e carbonáticas. Ou seja, apesar da maior parte de sua área estar sobre as rochas e solos residuais do metapelito, seus hidrogramas indicam uma similaridade com o comportamento das bacias carbonáticas. Além disso, a bacia do Jaque apresenta produtividade semelhante à bacia do Jaque, assim como a bacia do Flor é semelhante em produtividade à bacia do Palmeira.

## **2.2 Clima**

O clima da área é tipicamente tropical úmido (Aw), levando em conta a classificação de Köppen-Geiger (1900), e apresenta duas estações bem definidas no ano: inverno seco e frio, de abril a setembro, e verão quente e úmido, de outubro a março.

A partir da distribuição dos polígonos de abrangência de cada estação realizada pelo método de Thiessen (1911), foi calculada uma precipitação média de 1173 mm para o período de 1980 a 2021, conforme ilustrado no mapa da Figura 4.2.



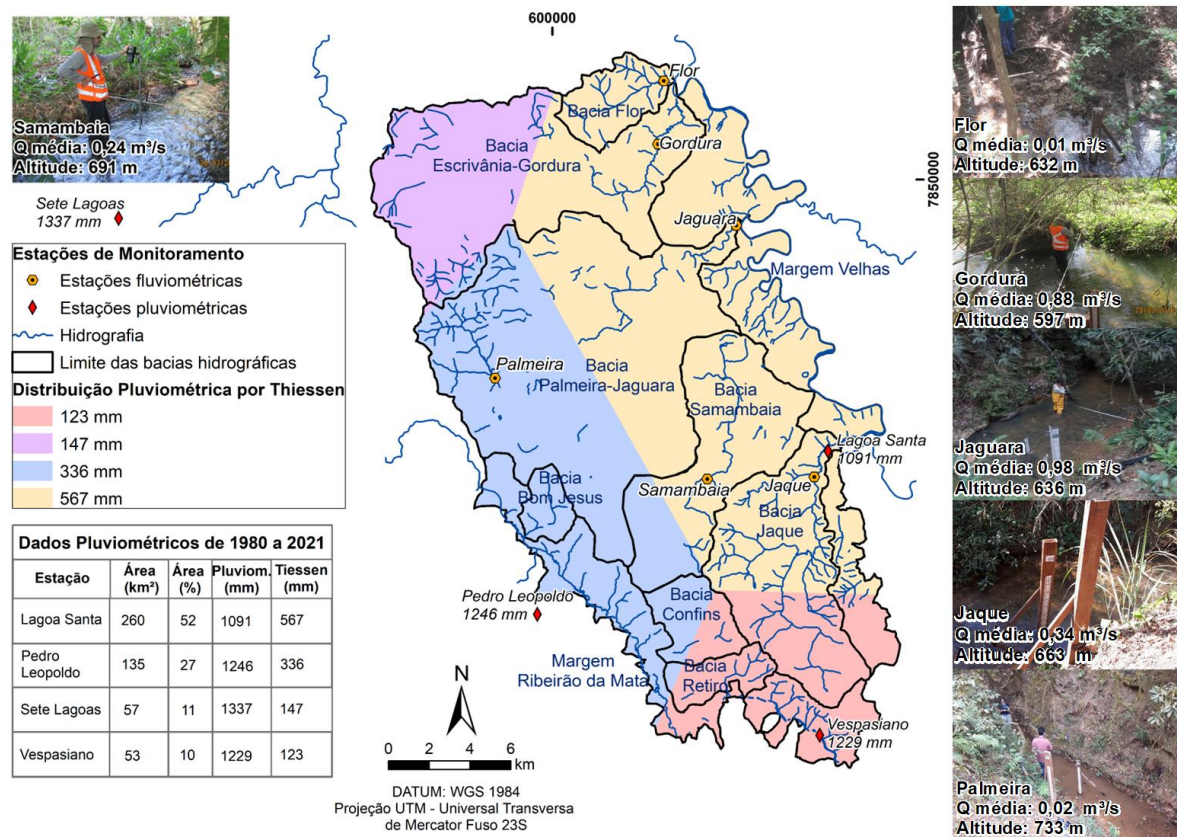


Figura 4.2 – Mapa de Thiessen com indicação das estações de monitoramento pluviométrico de abrangência na área (Sete Lagoas, Vespasiano, Lagoa Santa e Pedro Leopoldo). Há indicação ainda das estações de monitoramento fluviais.

### 2.3 Geomorfologia

A geomorfologia da área está intimamente ligada às características geológicas, estruturais e aos eventos de intemperismo. Por se tratar de um ambiente predominantemente cárstico, sua geomorfologia é caracterizada por feições e estruturas criadas a partir da dissolução das rochas carbonáticas e da formação de porosidade secundária nas rochas que refletirá na formação de condutos, cavernas e outras feições de dissolução típicas do carste.

Vários autores estudaram, ao longo dos anos, as características geomorfológicas da APA Carste Lagos Santa, a exemplo dos trabalhos de Kohler (1989), Auler (1994) e Piló e Castro (1998).

Apesar de menos abrangentes, as demais formações geológicas também possuem papel de moldar as características morfológicas do terreno. Kohler (1989) compartimentou a APA de Lagoa Santa em três domínios: domínio de rochas cristalinas e metamórficas, domínio de rochas carbonáticas e domínio de metapelitos e/ou do carste encoberto.

O domínio das rochas cristalinas e metamórficas, de menor ocorrência, ocorre na porção leste da área de estudo, onde afloram as rochas do Complexo Granito-gnáissico migmatítico. Este domínio apresenta relevo mais suave, em forma de colinas e/ou morros, com vertentes côncavas.

O domínio de rochas carbonáticas, por sua vez, possui maior abrangência na área e é marcado pelas feições típicas do carste, tais como altos paredões rochosos, depressões cársticas como dolinas, uvalas e polges, além de sumidouros e cavidades formadas pela dissolução da rocha carbonática.

Por fim, o domínio de Metapelitos e/ou Carste encoberto está atrelado às rochas da Formação Serra de Santa Helena e é mais presente na região norte da área. Apresenta relevo mais aplainado por conta da presença dos metapelitos, e as feições cársticas são menos presentes, já que as rochas carbonáticas estão encobertas pelos metapelitos. Mas são percebidas ainda dolinas e paredões, que são manifestações superficiais da carstificação em profundidade (MENESES, 2003).

Tendo como referência os compartimentos definidos para a APA de Kohler (1989), e interligando os compartimentos às litologias existentes, foi feita uma adaptação dos compartimentos de forma a abranger toda a área de estudo (Figura 4.3), com indicação ainda das principais feições cársticas mapeadas na área, como as depressões cársticas de Amaral (2018), cavernas mapeadas pela CECAV e disponíveis no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE, 2019), e o mapeamento de sumidouros de Teodoro *et al.* (2019).

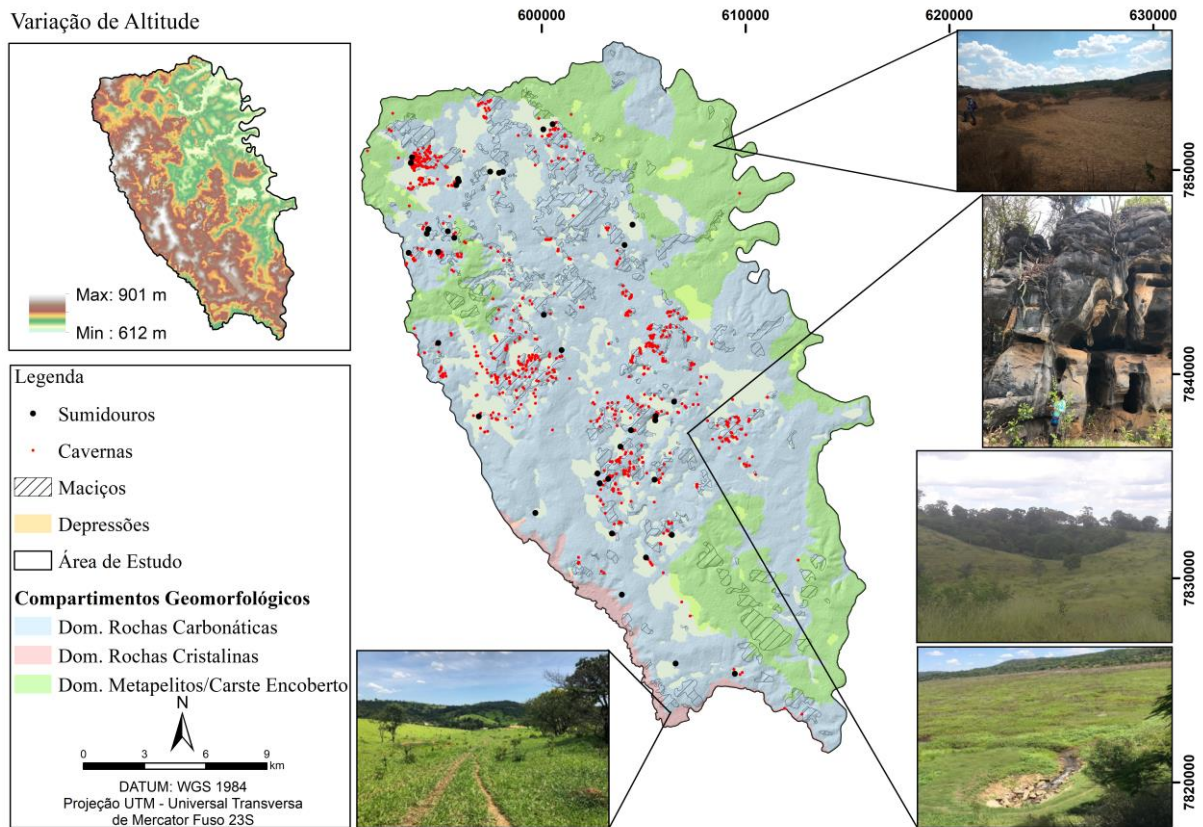


Figura 4.3 – Mapa com indicação dos compartimentos geomorfológicos, da variação de altitude e dos sumidouros, cavidades, maciços e das depressões mapeadas na área.

## 2.4 Pedologia

Conforme descrito por Viana *et al.* (1998) nos estudos pedológicos da APA Carste, as características do solo da área estão relacionadas às duas principais feições fisiográficas existentes: superfície rebaixada de Lagoa Santa – Sete Lagoas, e os planaltos segmentados em compartimentos geomorfológicos distintos.

As regiões mais planas da área são formadas por deposições aluvionárias do Quaternário e são constituídas principalmente por Gleissolos e Solos Aluvionares mal drenados a imperfeitamente drenados. Já nos planaltos predominam os latossolos e cambissolos argilosos, os quais são bem drenados, profundos, muito porosos e permeáveis. Apesar da predominância de um padrão tipicamente cárstico, percebe-se grande influência dos metapelitos que recobrem as rochas carbonáticas. As regiões de dolinas, por sua vez, são recobertas principalmente por cambissolo gleico eutróficos argilosos (VIANA *et al.*, 1998).

Souza (2020) realizou uma analogia entre os solos tropicais em áreas cársticas e solos mediterrâneos do sul da Espanha. Segundo o autor, enquanto os solos dessa localidade são pouco espessos (centimétricas), os solos da região da APA Carste de Lagoa Santa apresentam

espessuras de dezenas de metros. Além disso, segundo o autor, os solos europeus mediterrâneos tendem a ser menos intemperizados em comparação com os tropicais.

A Figura 4.4 corresponde ao mapa de solos da região, mapeado na escala de 1:50.000 por Viana *et. al* (1998) para a região da APA de Lagoa Santa, e em escala regional para o restante das áreas, considerando o mapa de solos de Minas Gerais na escala 1:650.000 realizado pela Universidade Federal de Viçosa – UFV (2010) e disponibilizado digitalmente pela Fundação Estadual de Meio Ambiente – FEAM.

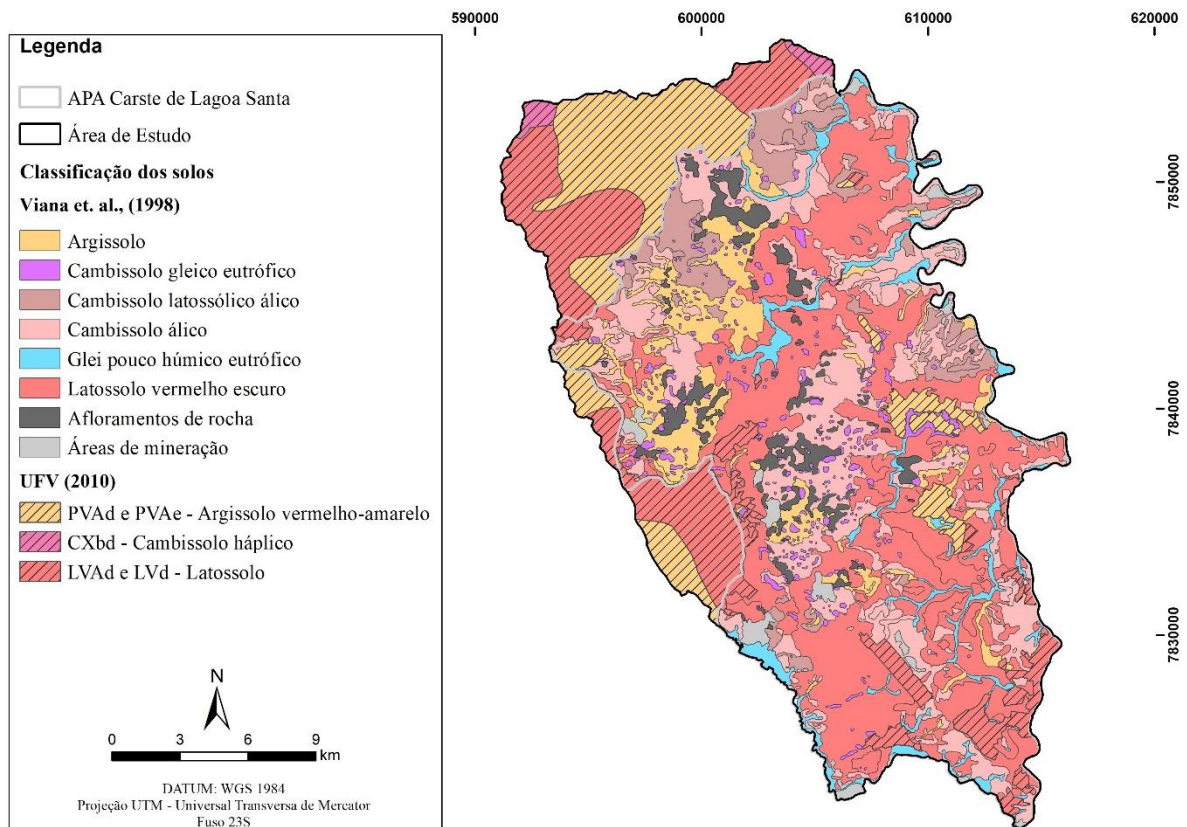


Figura 4.4 – Mapa de solos da área de estudo, a partir do mapeamento em escala 1:5000 de Viana *et al.* (1998) e do mapeamento em escala 1:650.000 elaborado pela UFV (2010).

Souza (2020) realizou uma caracterização física dos solos da área de estudo e o classificou como sendo argiloso. De forma geral, os latossolos e cambissolos apresentam na área o mesmo comportamento em relação à textura, evidenciado em ensaios de infiltração. Além disso, esses dois principais solos apresentam na área de estudo a mesma variabilidade de condutividade hidráulica ( $1 \times 10^{-3}$  a  $1 \times 10^{-4}$   $\text{cm.s}^{-1}$ ). Já os argissolos da região apresentam uma condutividade na ordem de  $1 \times 10^{-3}$   $\text{cm.s}^{-1}$  e os gleissolos de  $1 \times 10^{-5}$   $\text{cm.s}^{-1}$ .



### 3 GEOLOGIA

A geologia da área é dominada pelas rochas carbonáticas e siliciclásticas neoproterozoicas da Formação Sete Lagoas e Serra de Santa Helena do Grupo Bambuí. Este Grupo integra a bacia intracratônica do São Francisco, formada a partir da abertura do Oceano Atlântico.

O embasamento cristalino do Complexo Belo Horizonte aflora em uma pequena porção a oeste da área, e é constituído por rochas leucocráticas, com quartzo, feldspato e pouco ou quase nenhuma biotita (RIBEIRO *et al.*, 2003).

A Formação Sete Lagoas, por sua vez, abrange a maior parte da área e é dividida em Membro Pedro Leopoldo e Lagoa Santa. O Membro Pedro Leopoldo é constituído principalmente por metacalcários mais impuros, composto por outros minerais como sericita e quartzo. Já o Membro Lagoa Santa é composto principalmente por metacalcário com alto teor de pureza e, por conta disso, apresenta maior grau de carstificação.

Sotoposto à Formação Sete Lagoas, aflora a Formação Serra de Santa Helena, que é formada principalmente por metapelitos com alto grau de intemperismo e composto basicamente por argilominerais e quartzo. Uma característica diagnóstica dessa unidade é a presença de muitos veios de quartzos, normalmente paralelos ao acamamento da rocha (TEIXEIRA, PENA e SILVA, 2020).

Ocorrem ainda as coberturas recentes, tanto detrito-lateríticas aflorantes na região centro-oeste da área, quanto aluvionares com ocorrência principal ao longo dos cursos d'água.

No geral, as unidades do Grupo Bambuí aflorantes na área apresentam certo grau de recristalização por conta de movimentos ocasionados pelas falhas contracionais e de deslocamento basal, conforme indicado no mapa da Figura 4.5, referente ao mapeamento geológico de Ribeiro *et al.* (2003).

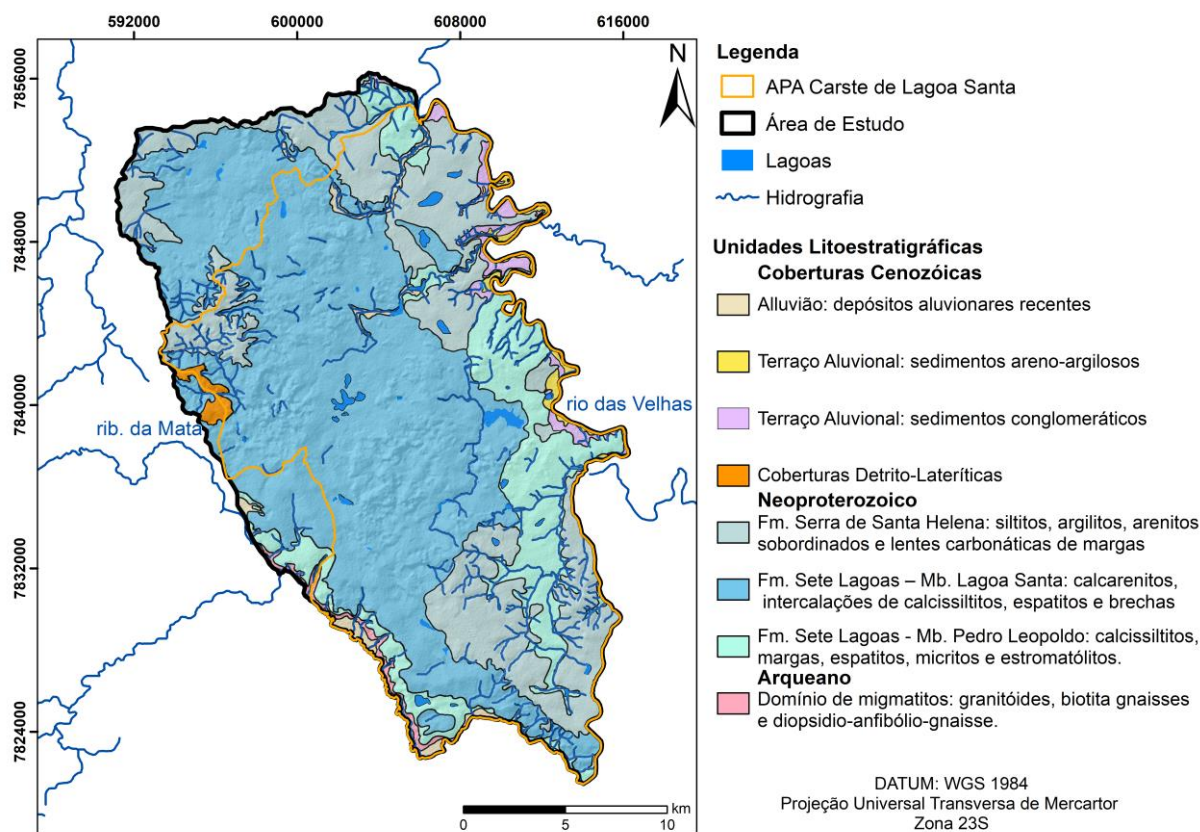


Figura 4.5 – Mapa geológico da região de estudo. Retirado de Ribeiro *et al.* (2003) e adaptado por trabalhos de Vieira (2015) e Ribeiro *et al.* (2016).

#### 4 HIDROGEOLOGIA

As unidades aquíferas mais produtivas e importantes da área estão vinculadas às rochas carbonáticas, cujas feições de dissolução criam passagens favoráveis à transmissão de água a partir da porosidade secundária (fraturas/fissuras) e terciária (condutos e cavernas).

Levando em conta os aspectos geológicos, morfológicos e estruturais, De Paula (2019) definiu quatro unidades hidroestratigráficas na área: unidade do Cristalino, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena e unidade de Cobertura.

A unidade do Cristalino está relacionada às rochas cristalinas do Complexo Granito-gnáissico-migmatítico. É caracterizada por ser um aquífero fissural com porosidade secundária.

A unidade mais relevante para o trabalho se trata da unidade de Sete Lagoas, a qual apresenta dois aquíferos principais: aquífero cárstico e cárstico-fissural. O aquífero cárstico está ligada aos metacalcários puros do Membro Lagoa Santa, cujas feições de dissolução condicionam uma porosidade terciária à rocha a partir da formação de condutos e cavernas. Já o aquífero cárstico-fissural está ligado aos metacalcários impuros do Membro Pedro Leopoldo. Por apresentar maior teor de impureza, há menos formação de porosidade terciária e, dessa

forma, a percolação de água na rocha está mais condicionada às fraturas/fissuras e à foliação da rocha.

A unidade Serra de Santa Helena, diferentemente das unidades descritas até então, é formada por um aquífero que transmite água para a unidade Sete Lagoas por meio dos planos de descontinuidade (DE PAULA, 2019). Portanto, esta unidade funciona como uma fonte de recarga para os aquíferos sobrepostos aos metapelitos. Por fim, a unidade de Cobertura é constituída justamente pelos depósitos detrítico-lateríticos e aluvionares que compõem a área. Trata-se de um aquífero suspenso de pouca espessura, com porosidade primária e que apresenta a função principal de recarregar os aquíferos inferiores de maior abrangência.

Com relação à recarga, Auler (1994) define que as zonas de recarga mais relevantes ocorrem nos afloramentos rochosos e nas depressões cársticas de abatimento, e por meio das coberturas das regiões preferencialmente planas e nos planaltos cársticos. As análises hidroquímicas de Auler (1994) indicaram ainda que a recarga da área é principalmente autogênica, ou seja, ocorre dentro da área do calcário, porém, De Paula (2019) e Teixeira, Pena e Silva (2020) descrevem uma importante entrada d'água externa à área pela surgência Bom Jardim, na bacia Palmeira-Jaguara.

Pessoa (2005) complementa ainda que a taxa de recarga em afloramentos calcários varia em afloramentos que estão expostos pela mineração, já que a taxa de infiltração é alta e não ocorre escoamento superficial. Mourão, Cruz e Gonçalves (2001) descrevem que a recarga da área está condicionada ao encaixe dos cursos d'água às fraturas e falhas existentes. Teixeira, Pena e Silva (2020) complementam ainda que a região de contato entre o embasamento e os metacalcários também funciona como local de recarga para a área de estudo, já que se trata de uma região de alto topográfico e região de contato entre o Grupo Bambuí e o embasamento.

Com relação à dinâmica de interação entre o regime de fluxo superficial e o subterrâneo, foi constatado por De Paula e Velásquez (2020) uma alta correlação entre os dois sistemas através da correlação cruzada dos dados de pluviometria e vazão, e obteve-se valores de 1 a 4 dias para que o efeito da pluviometria seja verificado no aumento da vazão, sendo as bacias carbonáticas com respostas mais rápidas que as bacias mistas.

Em se tratando da descarga geral do sistema, ela ocorre majoritariamente de oeste para leste, no sentido do gradiente hidráulico regional do aquífero, e descarrega do rio das Velhas, que funciona como o fluxo de base e drena todas as bacias da área, direta ou indiretamente. Conforme descrito por De Paula (2019), o rio das Velhas funciona como uma barreira semipermeável, e é responsável por receber cerca de 80% de toda água subterrânea do sistema.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Método APLIS Original

O método APLIS (Andreo *et al.*, 2004; 2008) é um método indireto de cálculo de recarga que permite estimar a taxa de recarga, expressa em porcentagem da precipitação, e a sua distribuição espacial a partir da sobreposição das variáveis Altitude, Inclinação, Litologia e Solo. Para tanto, são utilizadas ferramentas de geoprocessamento através de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para correlacionar todas as variáveis.

Inicialmente, foi definida uma ampla gama de variáveis geográficas, climáticas e geológicas que teriam influência na recarga, e a partir de análise de componentes principais (PCA), foram descartadas aquelas variáveis relacionáveis e/ou redundantes e selecionadas aquelas que apresentam maior influência na recarga.

Cada variável apresenta uma série, ou intervalo, para os quais são atribuídos valores/pesos, que variam de 1 (influência mínima da recarga) à 10 (máxima influência na recarga), conforme Figura 4.6.

| Altitude (m) | Pontuação | Inclinação (%) | Pontuação | Litologia  | Pontuação |
|--------------|-----------|----------------|-----------|--|-----------|
| ≤300         | 1         | ≤3             | 10        | Calcários e dolomitos carstificados                          | 10-9      |
| 300-600      | 2         | 3-8            | 9         | Calcários e dolomitos fraturados, parcialmente carstificados | 8-7       |
| 600-900      | 3         | 8-16           | 8         | Calcários e dolomitos fraturados                             | 6-5       |
| 900-1200     | 4         | 16-21          | 7         | Areias e cascalhos, colúvios                                 | 4         |
| 1200-1500    | 5         | 21-31          | 5         | Brechas e conglomerados                                      | 3         |
| 1500-1800    | 6         | 31-46          | 4         | Rochas plutônicas e metamórficas                             | 2         |
| 1800-2100    | 7         | 46-76          | 3         | Xisto, Pizarra, Silte, Argila                                | 1         |
| 2100-2400    | 8         | 76-100         | 2         |  |           |
| 2400-2700    | 9         | >100           | 1         |  |           |
| > 2700       | 10        |                |           |  |           |

| Infiltração preferencial                      | Pontuação | Solo   | Pontuação |
|---|-----------|--|-----------|
| Abundantes formas de infiltração preferencial | 10        | Leptosolos   | 10        |
|   |           | Arenosolos alvícos e Xerosolos cálcicos            | 9         |
|   |           | Regosolos calcáreos e Fluvisolos                   | 8         |
|   |           | Regosolos eútricos, dístricos e Solonchaks         | 7         |
|   |           | Cambissolos cálcicos                               | 6         |
| Escassas formas de infiltração preferencial   | 1         | Cambissolos eútricos                               | 5         |
|   |           | Histosolos eútricos y Luvisolos órticos e cálcicos | 4         |
|   |           | Luvisolos crômicos                                 | 3         |
|   |           | Planossolos  | 2         |
|   |           | Vertissolos crômicos                               | 1         |

Figura 4.6 – Tabelas do método APLIS original, com as pontuações atribuídas das categorias Altitude, Declividade, Litologia, Infiltração preferencial e Solo.

Os valores de altitude foram agrupados em intervalos de 300 m. Quanto maior o valor de altitude, maior será a precipitação e maior a recarga do aquífero. O parâmetro de declividade



foi classificado em intervalos irregulares e, quanto menor a inclinação do terreno, maior é a recarga de água para o aquífero. Para inclinações maiores de 100%, assumiu-se que a recarga é mínima ou invariável (ANDRÉO *et al.*, 2008).

As pontuações atribuídas ao critério de litologia foram definidas com base nas características hidrogeológicas de cada litotipo, por exemplo, se o litotipo é carstificado ou fraturado. Já a categoria Infiltração é dividida em apenas duas pontuações: existência (10 pontos) ou inexistência (1 ponto) de formas de infiltração preferencial, a e atribuição de apenas duas classes se deu por conta da inexistência de mapas geomorfológicos suficientemente detalhados nas regiões onde o método foi concebido (ANDRÉO *et al.*, 2008).

Por fim, para a categoria Solo, as classes determinadas e seus pesos foram definidos conforme as características de textura e espessura dos tipos de solos encontrados. Dessa forma, em solos com cobertura escassa e textura mais grossa, foi atribuída maior nota com relação aos tipos de solo mais espessos e argilosos.

Foram utilizados para definição dos pesos das variáveis, métodos estatísticos multicritérios, tais como análise de regressão, análise de ponto ideal e método da soma do peso linear. Porém, nenhum desses algoritmos resultou em uma estimativa de valor de recarga semelhante aos valores previamente calculados para os aquíferos da Espanha em questão (ANDRÉO *et al.*, 2008). A expressão que melhor se aproximou dos resultados previamente calculados foi a da Equação 1, após realizada a calibração dos pesos combinados com as taxas de recarga estimadas por técnicas convencionais.

$$R = (A + P + 3L + 2I + S) \div 0,9 \quad (1)$$

Sendo:

A = Altitude

P = declividade

L = Litologia

I = Infiltração preferencial

S = Solo

Dessa forma, percebe-se que as variáveis que mais têm influência são as de litologia e zonas de infiltração preferencial, com pesos 3 e 2, respectivamente.

Ao gerar os mapas rasterizados das variáveis, estas são sobrepostas a partir da equação do APLIS para se obter o mapa com a variação espacial da recarga, conforme esquematizado na Figura 4.7:

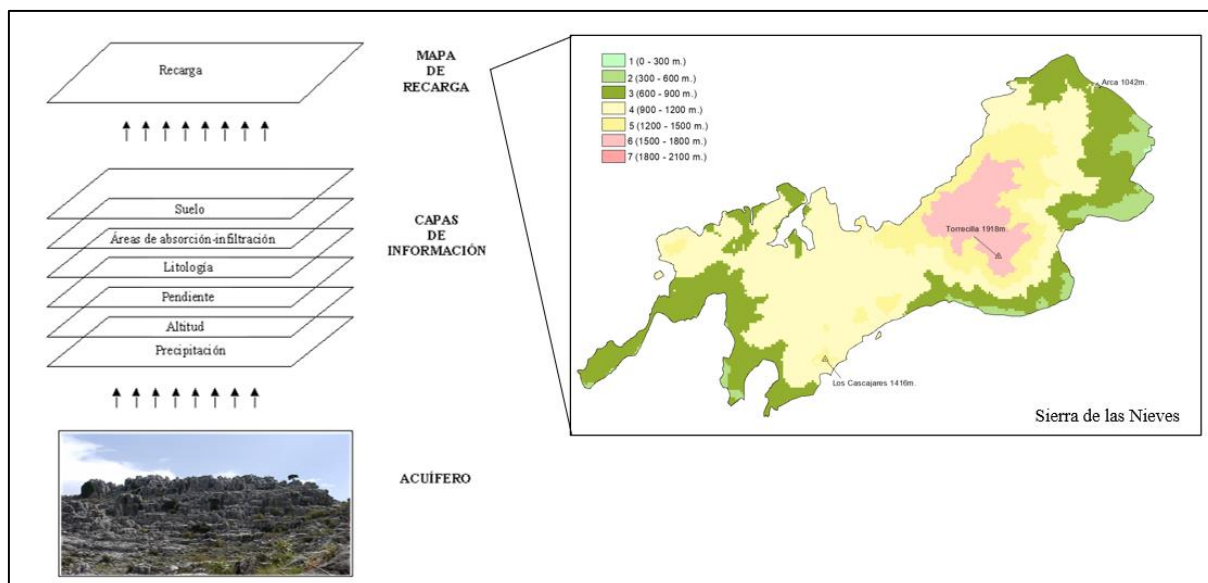


Figura 4.7 – Esquema explicativo da sobreposição das camadas para aplicação do método APLIS, com exemplo da aplicação na Sierra de las Nieves, Espanha. Adaptado de Andréo *et al.* (2008).

## 5.2 Método APLIS Adaptado

Para se aplicar o método no carste de ambiente tropical, é essencial a adaptação das classificações definidas, especialmente no que tange aos tipos de solo e aos litotipos definidos, já que são os atributos que mais irão variar entre o sistema tropical do mediterrâneo, onde o método foi concebido inicialmente.

A Figura 4.8 apresenta as tabelas do método APLIS adaptado às condições do carste de ambiente tropical.

| Altitude (m) | Pontuação | Declividade (%) | Pontuação | Litologia                   | Pontuação |
|--------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------------------|-----------|
| ≤300         | 1         | ≤3              | 10        | Metacalcários carstificados | 8         |
| 300-600      | 2         | 3-5             | 9         |                             |           |
| 600-900      | 3         | 5-10            | 8         | Metacalcários fissurados    | 6         |
| 900-1200     | 4         | 10-15           | 7         |                             |           |
| 1200-1500    | 5         | 15-20           | 6         | Sedimentos inconsolidados   | 4         |
| 1500-1800    | 6         | 20-30           | 5         |                             |           |
| 1800-2100    | 7         | 30-45           | 4         | Rochas plutônicas           | 2         |
| 2100-2400    | 8         | 45-65           | 3         |                             |           |
| 2400-2700    | 9         | 65-100          | 2         | Metapelitos                 | 1         |
| > 2700       | 10        | >100            | 1         |                             |           |

| Infiltração - absorção preferencial | Pontuação | Solo                                     | Pontuação |
|-------------------------------------|-----------|--|-----------|
| Afloramentos rochosos               | 10        | Área de mineração e afloramento de rocha | 7         |
| Depressões cársticas                | 5         | Latossolo e Cambissolo                   | 3         |
| Solo                                | 1         | Argissolo e Gleissolo                    | 1         |

Figura 4.8 – Tabelas do método APLIS adaptado às características do carste da área de estudo, com as pontuações atribuídas das categorias Altitude, Declividade, Litologia, Infiltração preferencial e Solo.

As variáveis Altitude e Declividade se mantiveram iguais ao método original, já a variável Litologia foi adaptada para representar da melhor forma o contexto geológico da área, seguindo o mapeamento de Ribeiro *et al.* (2003). A maior pontuação foi atribuída aos metacalcários do Membro Lagoa Santa (08 pontos) por ser as rochas mais carstificadas da área e, portanto, com maior capacidade de infiltração de água. Os metapelitos fissurados do Membro Pedro Leopoldo receberam a pontuação 06 por serem rochas com menos feições de cartificação em relação ao Membro Lagoa Santa, o que lhe confere menor capacidade de infiltração de água em relação aos metacalcários puros do Membro Lagoa Santa. As coberturas receberam pontuação 04, as rochas plutônicas pontuação 02, e os metapelitos da Formação Serra de Santa Helena a pontuação 01, seguindo a lógica de classificação e parâmetros de recarga do modelo original.

A variável Infiltração também foi modificada e incluída um valor intermediário. Isso se deu por conta da existência de mapas com maior detalhamento de zonas de infiltração preferencial do que o método original, com o mapeamento dos afloramentos rochosos de De Paula (2019), que recebeu pontuação de 10, mapa com as depressões cársticas de Amaral (2018) e que recebeu pontuação de 05. As regiões de maciços rochosos receberam o maior peso por se tratar de áreas mais favoráveis à infiltração de água da área, já que os maciços são muito fraturados e com fraturas de alto ângulo que favorecem a recarga, conforme levantamento estrutural de Ribeiro *et al.* (2016) e De Paula (2019). Já as regiões de solo, onde não foram

mapeados nem afloramentos rochosos nem depressões cársticas, receberam a menor pontuação, por entender que nessas áreas há pouco ou nenhuma feição cárstica que favorece a infiltração de água.

Por fim, a definição dos tipos de solos se baseou no mapa de solos de Viana *et al.* (1998) e UFV (2010) e na classificação de condutividade hidráulica de Souza (2020) a partir de testes de infiltração dos solos na região de estudo. Dessa forma, onde há pouca ocorrência de solos, ou seja, nas zonas com maciço exposto (afloramentos ou regiões de mineração), foi atribuída a nota máxima. Os latossolos e cambissolos receberam juntos a mesma pontuação de 09 pela similaridade dos valores de condutividade hidráulica e comportamentos frente à infiltração.

O método foi então aplicado utilizando a equação com os pesos dos parâmetros Altitude, Inclinação, Litologia, Infiltração e Solo. Além disso, foram realizados vários testes modificando os pesos das variáveis de forma a calibrar os resultados com os valores de recarga previamente calculados por Teixeira *et al.* (2023, no prelo) e conforme o entendimento do comportamento da área frente à recarga e do grau de importância que cada parâmetro influi nos resultados. A partir disso, a recarga foi classificada como muito baixa (taxas de recarga menores que 20%), baixas (entre 20 e 40%), moderada (entre 40 e 60%), alta (entre 60 e 80%) e muito alta (acima de 80%), conforme classificação de Andréo *et al.* (2004).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados os mapas base que foram sobrepostos para a obtenção do mapa categórico da recarga da área. O método foi calibrado a partir das características físicas da área e a partir da comparação entre os valores de recarga previamente calculados por métodos diretos de quantificação.

Para o parâmetro Altitude (A), há apenas uma classe a considerar, do intervalo de altitude entre 600 a 900 m, e por isso a pontuação obtida para toda a área foi de 03. Diferentemente do contexto da Espanha, a geomorfologia da região estudada é de um ambiente que já registrou grande alteração intempérica por serem terrenos antigos, da Era Neoproterozoica, diferentemente dos terrenos recentes formados pelos carbonatos estudados na Espanha, da Era Mesozoica. Por isso, as variações de altitude na área estudada são muito menos pronunciadas. Dessa forma, pode-se considerar que esse parâmetro exerce menos influência na estimativa de recarga na área estudada do que na região onde foi concebida.

Para o parâmetro Declividade (P), a área apresenta todas as 10 classes. Percebe-se que as áreas com maiores declividades são nas bacias Palmeira-Jaguara e na bacia do Samambaia.

As regiões de menor declividade são as regiões com lagoas a as regiões central e nordeste do mapa.

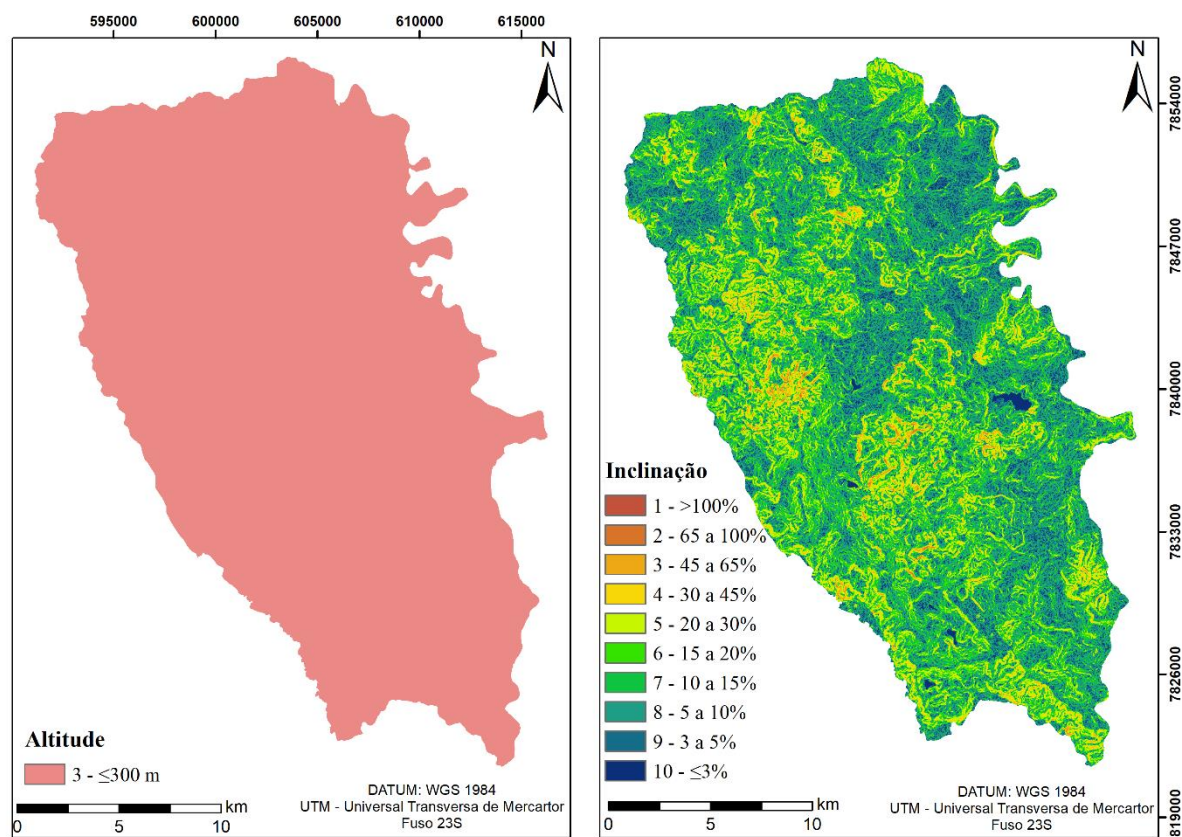


Figura 4.9 – Mapas resultantes da classificação dos parâmetros Altitude e Inclinação.

O mapa resultante da avaliação do parâmetro Litologia (L) da Figura 4.10 resultou em 03 classes distintas: classe 01 (Folhelho, Ardósia e materiais argilosos) característico do Formação Serra de Santa Helena, com 25% de toda área; classe 02 (rochas plutônicas do Complexo Belo Horizonte) com menos de 1% da área, classe 04 (cobertura sedimentar) com cerca de 5 % da área, classe 06 (calcários fissurados do Membro Pedro Leopoldo) com cerca de 14% da área, e classe 08 (calcários carstificados do Membro Lagoa Santa) com cerca de 55% de toda área. Dessa forma, percebe-se que a maior parte da área é mapeada como sendo pertencente ao Membro Lagoa Santa, que recebe a maior pontuação. Porém, a realidade da área é a de poucos afloramentos de rocha e uma cobertura espessa de solo e, por isso, este parâmetro apresenta um peso maior em regiões temperadas do que em regiões tropicais onde há maior preservação de afloramentos rochosos por conta de suas características climáticas.

O mapa resultante do parâmetro Infiltração Preferencial (I) da Figura 4.10 é entendido, no contexto da área, como sendo o parâmetro que mais influencia a recarga aquífera, pois as feições de infiltração funcionam como zonas facilitadoras da percolação e infiltração de água. As três classes existentes na região são as classes 01, representada pelas regiões de solo que

exibem escassas formas de infiltração preferencial, a classe 02 como sendo a classificação intermediária, representada pelas áreas com depressões cársticas mapeadas, e a classe 03 como sendo as áreas com abundantes formas de infiltração preferencial, representada pelos afloramentos rochosos vetorizados por Pacheco (2023, no prelo).

Pelo mapa, constatou-se que 74% é formado por zonas de solo, 14% por depressões cársticas (dolinas, uvalas e poljes) e o restante por afloramentos de calcário. As regiões com coberturas de solo estão distribuídas por toda área de estudo. As zonas com depressões cársticas e maciços rochosos seguem aproximadamente a direção NW-SE, coerente com o que mapeado como sendo os calcários do Membro Lagoa Santa.

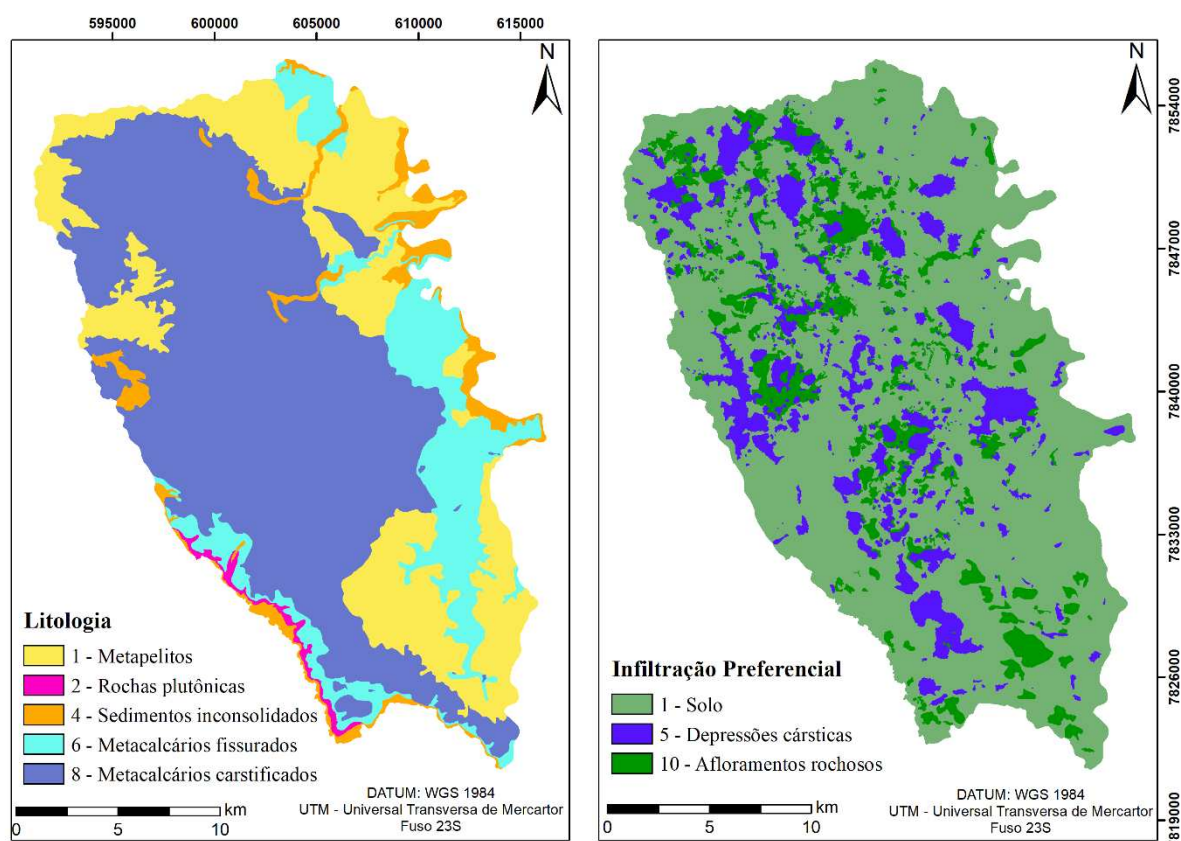


Figura 4.10 – Mapas resultantes da classificação dos parâmetros Litologia e Infiltração Preferencial.

O mapa de solos (S) da Figura 4.11 gerou 03 classes diferentes. A classe 01 é formada pelos argissolos e gleissolos, que apresentaram a mesma condutividade hidráulica calculada por Souza (2020), e que foram agrupados por conta de suas similaridades. Essa classe abrangeu cerca de 20% da área de estudo e são as áreas com solos mais argilosos e, portanto, com menor capacidade de infiltração.

A classe 02 é formada pelos cambissolos e latossolos e perfazem juntos 67% da área. Apresentam a mesma variabilidade de condutividade hidráulica, sendo maior que a dos



argissolos e gleissolos. Além disso, apresentam o mesmo comportamento em relação à textura, evidenciado nos ensaios de infiltração (SOUZA, 2020).

Por fim, a classe 07 é formada pelos afloramentos de maciços rochosos, os paredões de calcários mapeados e fotointerpretados, e também pelas áreas de mineração com maciços expostos. Essa classe perfaz 13% do mapa.

O último mapa de classificação pertence ao fator FH (Figura 4.11), em que classifica a área como aquífera e não aquífera. Foi atribuído a classificação 01 as áreas com afloramentos rochosos e depressões cársticas, e a classificação 0,1 para o restante da área.

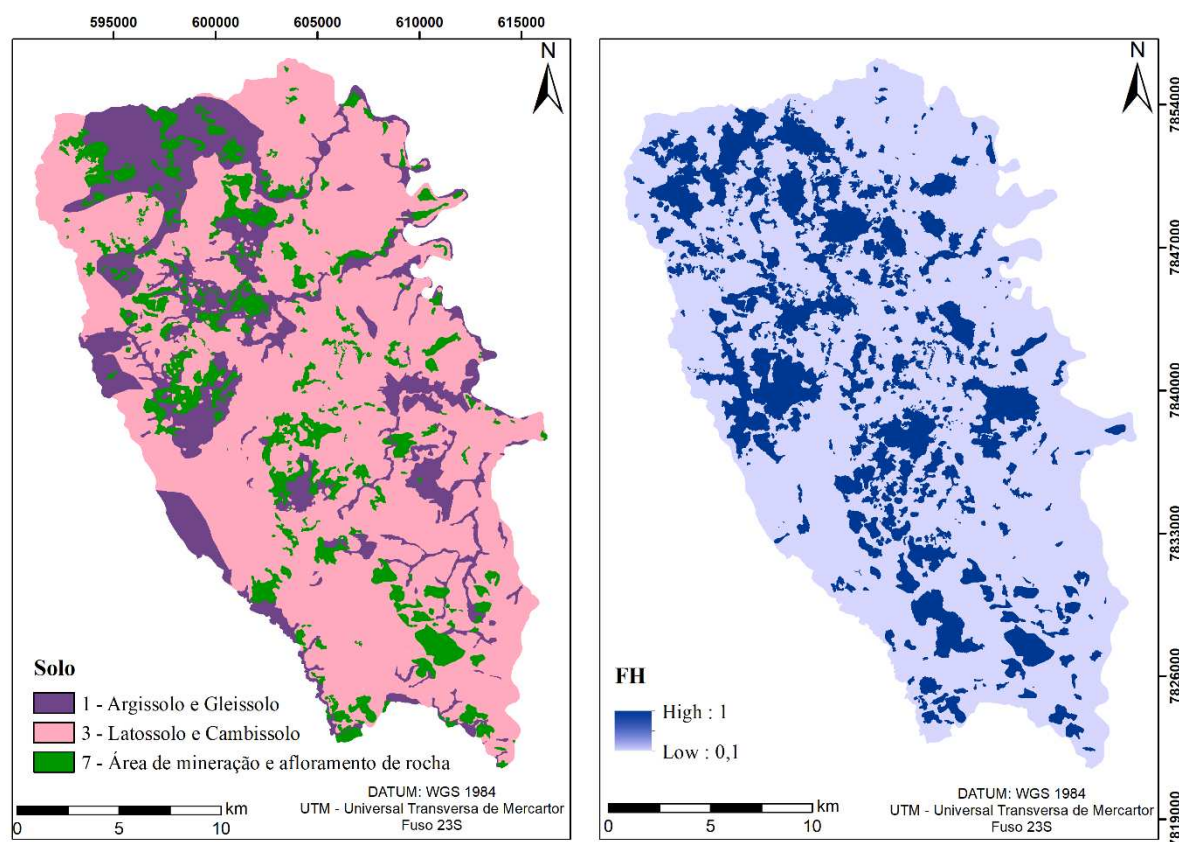


Figura 4.11 – Mapas resultantes da classificação dos parâmetros Solo e FH.

Foram realizados teste para calibração tanto das classes quanto do peso dos parâmetros da Equação 1, de forma a representar da melhor maneira as características da área e sua influência com a recarga, a partir dos mapas das classes apresentados anteriormente. Considerando que as zonas com estruturas facilitadoras da infiltração e água, tais como as áreas de afloramentos e depressões cársticas, a classe de Infiltração Preferencial recebeu o maior peso, seguida das Classes de Litologia (áreas mapeadas como calcário apresentam mais feições de infiltração), Solo (menos influência que na equação original, já que os solos das regiões estudadas são no geral argilosas e com espessa cobertura), Inclinação e Altitude (menos influência que na equação original já que a área apresenta-se toda em um único intervalo).

Levando em consideração as relações percebidas entre os parâmetros para as condições do carste encoberto estudado, chegou-se à seguinte relação dos parâmetros adaptado conforme Equação 2:

$$R = ((0,5A + P + 2L + 3I + 1,5S) \div 0,9) \times F_h \quad (2)$$

Ressalta-se que os pesos apenas foram redistribuídos entre os parâmetros da equação. Ou seja, a soma ponderada dos pesos se manteve a mesma que a da equação original.

Dessa maneira, aplicando as classes e a equação adaptadas, obteve-se o mapa com a setorização da recarga conforme a Figura 4.12.



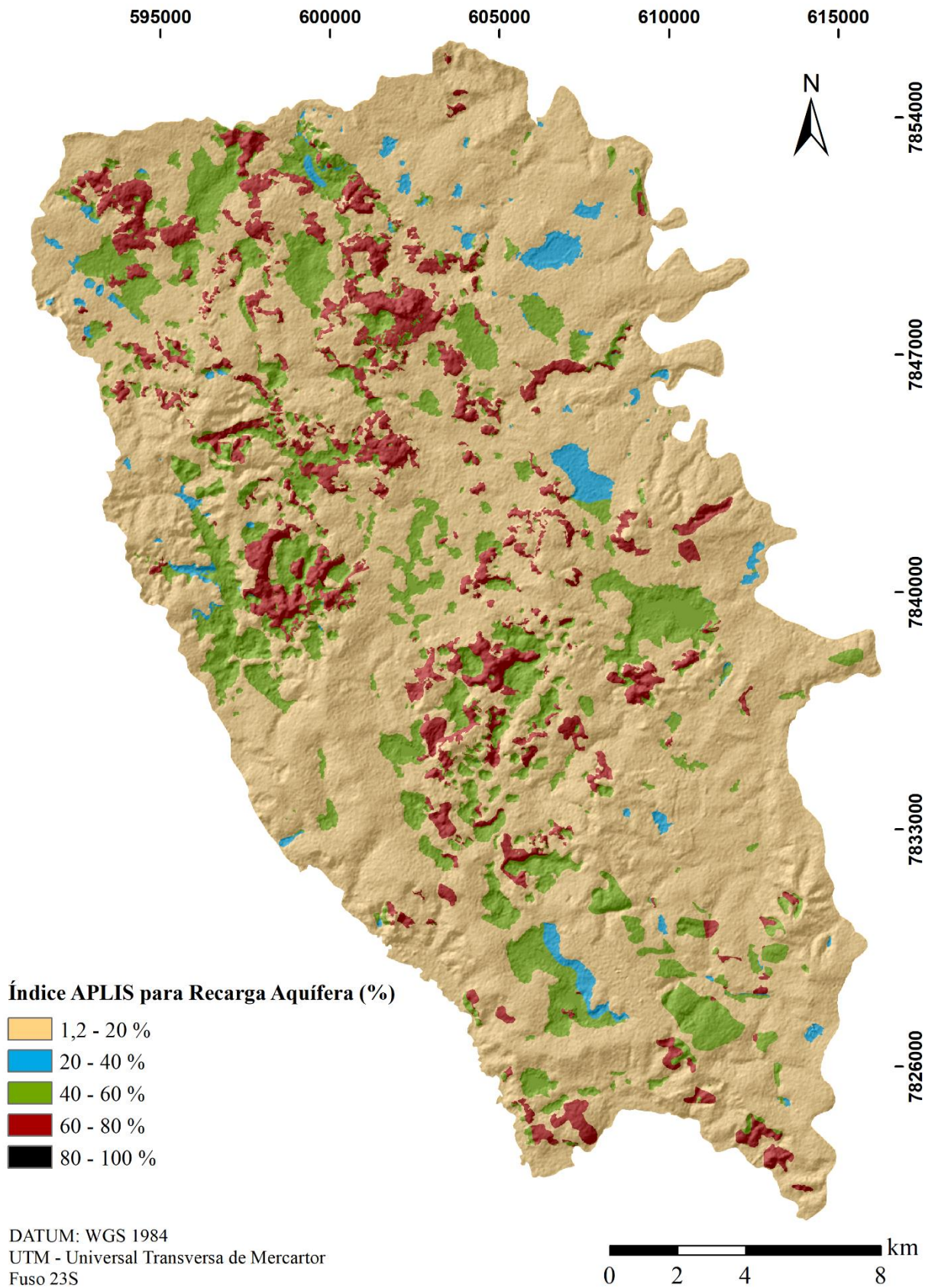


Figura 4.12 – Mapa da taxa de recarga do método APLIS Adaptado.

Seguindo os intervalos de valores de recarga definido por Andreo *et. al.* (2004), a área de estudo apresenta recarga predominantemente muito baixa, obtendo uma média geral de 16,47% (Tabela 4.1). As porções com maiores taxas de recarga foram as regiões centrais e nordeste, onde há maior concentração de maciços rochosos e de depressões cársticas.

A Tabela 4.1 exhibe a comparação das taxas de recarga mínima, média e máxima calculadas pelo método original pelo método modificado.

Tabela 4.1 – Comparação das taxas mínima, média e máximas do método APLIS original e adaptado.

| Equação  | Mínimo (%) | Média (%) | Máxima (%) |
|----------|------------|-----------|------------|
| Original | 1,33       | 16,55     | 71,11      |
| Adaptado | 1,22       | 16,47     | 75,55      |

Mesmo obtendo valores de taxas similares, ainda assim entende-se que a equação adaptada é mais coerente devido às relações de influência dos parâmetros de entrada para aquíferos cársticos com contexto geológico do neoproterozoico com espessa cobertura de solo.

Em seguida, foi realizada a setorização do mapa com os resultados do APLIS adaptado por bacia hidrográfica, e realizada a comparação com os resultados do cálculo da recarga direta previamente calculados por Teixeira *et al.* (2023, no prelo) a partir do monitoramento das descargas das bacias em quatro anos hidrológicos. A média obtida foi similar aos valores calculados pelo método de Rorabaugh (1964) de 13%, Lyne e Hollick (1979) de 9% e de Healy and Cook (2002) de 9%. A Tabela 4.2 apresenta a média da recarga calculada por bacia hidrográfica a partir dos métodos de recarga bacinal de Rorabaugh (1964) e de Lyne e Hollick (1979).

Tabela 4.2 – Comparação dos resultados das taxas de recarga setorizada por bacia hidrográfica.

| Bacia Hidrográfica | Recarga Média (%) |                   |                        |
|--------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
|                    | APLIS Adaptado    | Rorabaugh* (1964) | Lyne e Hollick* (1979) |
| Jaque              | 10,48             | 15,21             | 8,49                   |
| Samambaia          | 18,51             | 13,47             | 11,95                  |
| Palmeira-Jaguara   | 21,73             | 18,42             | 11,19                  |
| Escrivânia-Gordura | 21,87             | 28,43             | 21,55                  |
| Flor               | 4,23              | 1,54              | 0,88                   |
| Confins            | 17,49             | -                 | -                      |
| Ribeirão da Mata   | 9,46              | -                 | -                      |
| Bom Jesus          | 6,70              | -                 | -                      |
| Retiro             | 18,08             | -                 | -                      |
| Rio das Velhas     | 6,73              | -                 | -                      |

\* Taxas de recarga médias referentes aos anos hidrológicos de 2017-2021

Percebe-se alta aderência dos resultados setorizados por bacia em relação aos valores calculados pelos outros dois métodos de recarga direta, o que transmite confiabilidade no cálculo das taxas de recarga pelo método APLIS adaptado, inclusive na estimativa das bacias hidrográficas onde não é realizado monitoramento de suas descargas.

Foi realizada ainda a separação para quantificação da taxa de recarga separada pelas regiões onde há predominância de solo, de depressões cársticas e de maciços rochosos, conforme mapa da Figura 4.13.

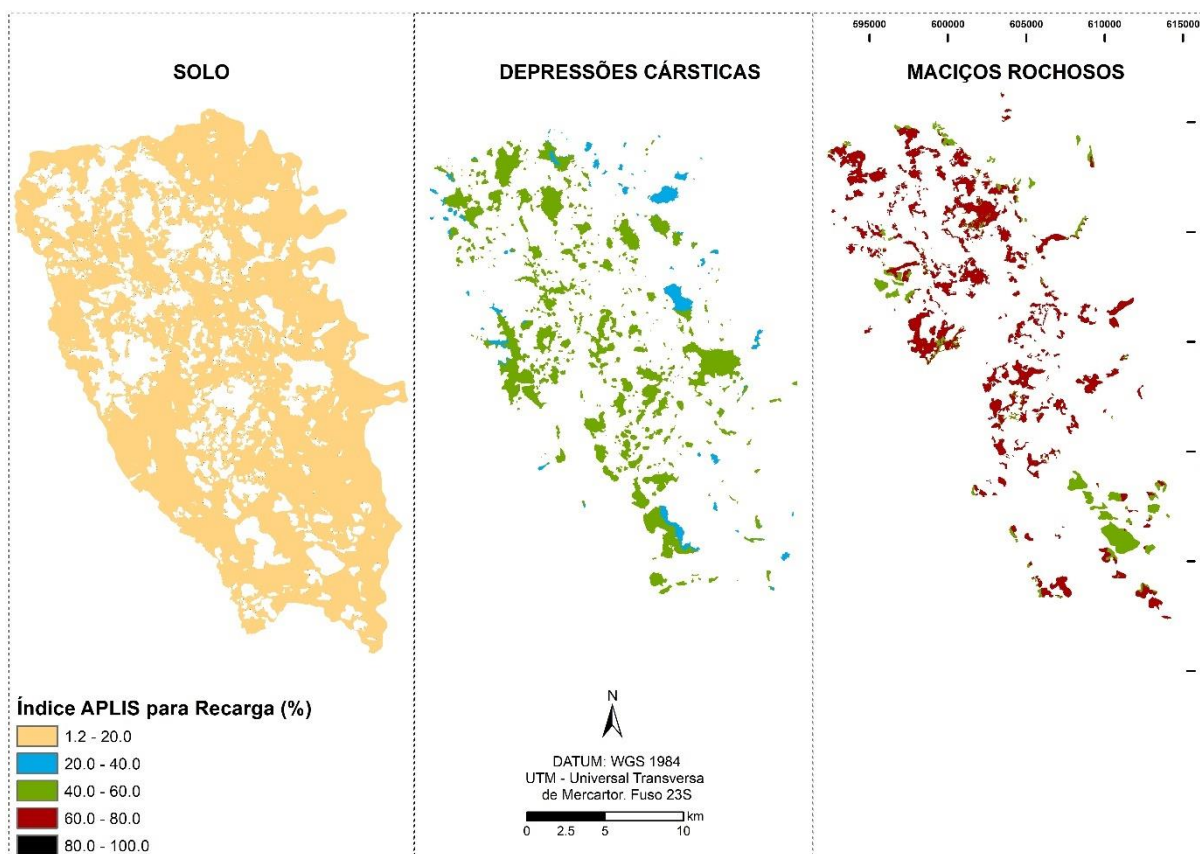


Figura 4.13 – Mapas de recarga calculado pelo método APLIS adaptado, setorizado em regiões de cobertura de solo, de depressões cársticas e de maciços rochosos.

A Tabela 4.3 apresenta o resumo dos resultados de recarga setorizada.

Tabela 4.3 – Resultado das taxas de recarga mínima, média e máxima calculadas pelo método APLIS adaptado, nas regiões onde predominam a cobertura de solo, os maciços e as depressões cársticas.

|                      | Mínimo (%) | Média (%) | Máximo (%) |
|----------------------|------------|-----------|------------|
| Solo                 | 1,22       | 2,93      | 4,55       |
| Depressões Cársticas | 24,44      | 46,39     | 60,00      |
| Maciços rochosos     | 41,11      | 66,35     | 75,55      |

Quando analisado separadamente, percebe-se uma taxa bastante elevada nas regiões de maciços rochosos, com uma média de 66,35%, e são as regiões onde se espera de fato uma maior infiltração da água pluviométrica. A existência de muitas fraturas de alto ângulo mapeados nos maciços por Ribeiro *et al.* (2016) e De Paula (2019), e que normalmente são fraturas muito abertas e desenvolvidas devido ao alto grau de dissolução das rochas, explica as altas taxas de recarga nessas áreas.

Não foi realizado neste trabalho a separação entre os maciços expostos e os maciços com cobertura vegetal, mas entende-se que a taxa de recarga tende a ser ainda maior em maciço sem cobertura vegetal, pois estes não sofreriam tanta influência da absorção de água pelas plantas.

As depressões cársticas, por sua vez, apresentaram uma taxa de recarga média de 46,39%. Essa taxa também é esperada em regiões com tais características, já que o seu escoamento superficial tende a ser pequeno, o que contribui para o aprisionamento da água nas depressões, agindo apenas os parâmetros de infiltração e evapotranspiração (DE PAULA, 2019).

As áreas com alta cobertura de solos e sem presença de afloramento e depressões cársticas são as regiões de maior abrangência da área, o que é esperado em áreas de clima tropical-úmido. Devido às características do solo da região, descrito por Souza (2020) como sendo solos argilosos, são esperadas taxas de recarga baixas. A média da taxa de recarga calculada pelo método adaptado foi de 2,93%.

Por último, foi feita também a correlação entre a recarga separada por litotipos, a saber os calcários do Membro Lagoa Santa, Membro Pedro Leopoldo, Formação Serra de Santa Helena, Complexo Gnaissico Migmatítico e das coberturas em geral. Os resultados das taxas de recarga médias estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultado das taxas de recarga médias calculadas pelo método APLIS adaptado.

| Litotipos                      | Média (%) |
|--------------------------------|-----------|
| Membro Lagoa Santa             | 23,06     |
| Membro Pedro Leopoldo          | 8,55      |
| Formação Serra de Santa Helena | 8,40      |
| Complexo G. Migmatítico        | 7,84      |
| Coberturas                     | 6,03      |

Como era esperado, os metacalcários do Membro Lagoa Santa apresentaram as maiores taxas de recarga da área, muito em função da maior concentração de maciços rochosos associados com dolinas e feições de infiltração preferencial.

O Membro Pedro Leopoldo, por ser constituído de metacalcários com menor intensidade de carstificação, e, dessa forma, com menos feições de infiltração preferencial, é coerente que apresente menor taxa de recarga. A grande similaridade entre as taxas de recarga desse litotipo com a taxa calculada para a Formação Serra de Santa Helena pode ser devido principalmente à existência de depressões cársticas nos metapelitos dessa formação. Como a Formação Serra de Santa Helena recobre os metacalcários da Formação Sete Lagoas, o desenvolvimento de depressões nas rochas carbonáticas acaba abatendo também o relevo nas rochas sobrepostas, neste caso, nos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena, favorecendo, desse modo, a recarga nessas porções.

Em relação às coberturas, entende-se que por essas estarem sobre uma camada espessa de solo ou rocha pouco carstificada, apesar de apresentarem porosidade mais elevada, o agente predominante nas coberturas será a evapotranspiração, obtendo taxas de recarga menores que o esperado.

Por fim, as rochas cristalinas apresentam valores de recarga coerente com o tipo de terreno, sendo estas bem similares ao do Membro Pedro Leopoldo, que apresenta um menor nível de fraturamento, e se assemelhando ao sistema fissural do Complexo Granito Migmatítico.

No geral, a recarga média da área como um todo é classificado como muito baixo, muito em função da alta cobertura de solos, e que acaba por diminuir os índices gerais de recarga. No entanto, quando realizada uma análise por feições cársticas e regiões de maciços rochosos, os índices de recarga aquífera podem chegar a até 76% da precipitação. Esses locais, apesar de possuírem menor abrangência de ocorrências na área, são importantes de serem realizadas estimativas separadas para melhor gestão, preservação e monitoramento dessas porções de alta relevância ambiental.

## 7 CONCLUSÕES

O método APLIS, originalmente aplicado para as regiões cársticas da Espanha, foi adaptado neste trabalho para representar regiões cársticas de ambiente tropical-úmido, tendo como área piloto os metacalcários da APA Carste de Lagoa Santa e arredores. Inicialmente, foram gerados os mapas dos parâmetros adaptados a partir de suas pontuações estabelecidas através das características físicas, geológicas e geomorfológicas da área.

O mapa de altitude apresentou apenas uma classificação, já que toda área está contida no intervalo de 300 a 900 metros de altitude. Dessa forma, constata-se que o carste estudado apresenta menos variação altimétrica, por se tratar de terrenos antigos e altamente intemperizados, e por isso o critério Altitude apresenta menos peso para a estimativa de recarga. O mapa de Litologia, por sua vez, indicou que a maior parte da área pertence ao Membro Lagoa Santa. Porém, a presença de poucos afloramentos e a alta cobertura de solos acaba por diminuir o peso desse parâmetro na área de estudo. Já o parâmetro de Infiltração preferencial foi considerado como sendo o parâmetro que exerce maior influência na recarga aquífera, já que são áreas de conexão direta com o aquífero. Após diversos testes de calibração, tanto das tabelas de classificações dos parâmetros, quanto nos pesos dos parâmetros na equação do APLIS, e observada a variação estatística dos resultados dos índices obtidos para a recarga, foi realizada a modificação do método para adaptação às condições mais similares ao carste neoproterozoico de clima tropical, e, a partir dessa adaptação, foi gerado o mapa com a distribuição espacial da taxa recarga. De maneira geral, a recarga da área é predominantemente baixa, com maiores taxas de recarga nas regiões centrais e nordeste, onde há maior concentração de maciços rochosos e de depressões cársticas. A média geral foi muito similar aos resultados calculados previamente por outros métodos da área a partir do monitoramento das descargas das bacias em quatro anos hidrológicos, a citar Rorabaugh (1964), Lyne e Hollick (1979), com taxas médias anuais de 13% e 9%, respectivamente. Quando se compara a média da recarga por bacia hidrográfica, percebe-se alta aderência dos resultados com relação aos resultados obtidos pelos métodos de separação de escoamentos, o que gera confiança na aplicação do método em bacias onde não é realizado o monitoramento de suas descargas, e exhibe a importância e robustez de ter um método indireto calibrado, pois esse pode ser utilizado para aplicações em área de difícil acesso, e mesmo visando diminuir o custo de trabalhos. Quando a recarga é analisada separadamente nas regiões de solo, depressões e maciços rochosos, as médias percebidas nessas regiões são de 2,93%, 46,39% e 66,35%, respectivamente. Essas estimativas são coerentes visto as características que cada região exerce na recarga, sendo as zonas de maciços rochosos muito

propensas à recarga aquífera devido à intensidade de fraturamento de alto ângulo dos maciços mapeadas, e que no geral são fraturas muito abertas e desenvolvidas devido ao alto grau de dissolução da rocha, e a ausência de escoamento superficial nas depressões cársticas. Essa mesma comparação foi realizada para os diferentes tipos de litologia, e a taxa média de recarga variou de 6 a 23% entre as litologias existente na área, sendo o Membro Lagos Santa o de maior valor. A taxa de recarga não foi maior justamente por conta da interferência do capeamento espesso do solo espessa presente em praticamente toda a área estudada. Essa setorização permitiu o cálculo da recarga em regiões geológicas menos expressivas que as regiões carbonáticas, e muitas vezes desprezadas, como o a recarga nos aquíferos fissurais do granito-gnaisses, além das coberturas, que muitas vezes funcionam como aquíferos suspensos. Este trabalho, além de apresentar a recarga por um método indireto, foi importante na definição e validação da recarga de todas as bacias da área, e também dos litotipos e feições de recarga, o que demonstra a relevância e de se utilizar um método indireto calibrado.

## 8 REFERÊNCIAS

AMARAL, D.G.P. **Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG)**. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 154p. 2018.

ANDREO B.; VÍAS J.; LÓPEZ-GETA J.A.; CARRASCO F.; DURÁN J.J.; JIMÉNEZ P. Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. **Boletín geológico y minero**, 115(2), 177-186. 2004.

ANDREO, B.; VÍAS, J.; DURÁN, J.J.; JIMÉNEZ, P.; GETA-LÓPEZ, J. A.; CARRASCO, F. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. **Hydrogeology Journal**. 16: 911. 2008.

AULER, A.S. **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil**. Msc Thesis, Department Of Geography And Geology, Western Kentucky University, Bowling Green,.110 f. 1994.

CANIE - **Cadastro nacional de informações espeleológicas**, 2019. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>. Acesso em: 12 jan. 2023.

DE PAULA, R.S. **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste Lagoa Santa, MG**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 279p. 2019.

DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Method to complete flow rate data in automatic fluvimetric stations in the karst system of Lagoa Santa area, MG, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**. 2020.



FARFÁN, H.; CORVEA, J. L.; DE BUSTAMANTE, I. Sensitivity analysis of APLIS method to compute spatial variability of karst aquifers recharge at the National Park of Viñales (Cuba). **Advances in research in karst Media**, 19-24. 2010.

GOMES, R.M.D.A. **Modelo hidrogeológico conceitual e análise da favorabilidade hidrogeológica do aquífero cárstico na região urbana de Sete Lagoas–MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 113p. 2020.

HEALY, R.W.; COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology journal**, 10(1), 91-109. 2002.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Comitês, Portal – Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas**. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-sf5>. Acesso em: 14 ago. 2022.

KOHLER, H. C. **Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa**. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo. 1989.

KÖPPEN, W.G., Geiger R. **Klimate der Erde**. Gotha Verlagcondicionadas, Justus Perthes. 1928.

LYNE, V., HOLLICK, M. Stochastic Time-Variable Rainfall-Runoff Modeling. Institute of Engineers Australia National Conference, Org. Institute of Engineers **Australia National Conference**, p. 89– 93. 1979.

MENESES, I.C.R.R.C. **Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 187 f. 2003.

MOURÃO, M.A.A.; CRUZ W.B.; GONÇALVES, R.LF. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. **In: Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais**. Belo Horizonte, 327 – 349. 2001.

PACHECO, W.M.N. **Comportamento hidrodinâmico das lagoas da região da APA Carste de Lagoa Santa**. Tese de doutorado. Instituto de Geociências – UFMG. Belo Horizonte, MG. 2023. No prelo.

PESSOA, P.F.P. **Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG**. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 375 p. 2005.

PILÓ, L.B.; CASTRO, S.S. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú-Carste de Lagoa Santa, MG**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1998.

RIBEIRO, C.G., MEIRELES, C.G., LOPES, N.H.B., ARCOS, R.E.C. **Levantamento Geológico estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Trabalho Geológico de Graduação. 2016.

RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FILHO, A.D.; PADILHA, AV.; CÓRDOBA, C.V. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa



Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – **Relatório final CPRM**, 2ª ed, escala 1:50.000. 2003.

RORABAUGH, M.I. **Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow**. International Association of Scientific Hydrology Publication 63, 432–441. 1964.

SOARES, L.C. **Estimativa da recarga aquífera na Bacia do Rio Riachão, MG**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 176p. 2012.

SOUZA, R.T. **Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido**. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2020.

TAPIA, N. **Aplicación de metodologías para la estimación espacial de recarga y conductividad hidráulica**. Caso de los andes centrales en Perú. Universidad de Málaga. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/444778842/Metodologia-APLIS-Peru>. 2011.

TEIXEIRA, G.M.; PENA, M.A.C.; SILVA, P.H.P. **Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Trabalho de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2020.

TEODORO M.I.P.; VELÁSQUEZ L.N.M.; FLEMING P.M.; DE PAULA R.S.; SOUZA R.T.; DOI B.B. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de Traçadores Corantes, na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, 33(4):392-406. 2019.

THIESSEN, A.H. **Precipitation Averages for Large Areas**. Monthly Weather Review, 39, 1082-1089. 1911.

UFV - CETEC - UFLA - FEAM. 2010. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acesso em: 27 out. 2022.

VELÁSQUEZ, L.N.M.; ANDRADE, I.B.; RIBEIRO, C.G.; AMARAL, D.G.P.; VIEIRA, L.C.M.; CARDOSO, F.A.; PAULA, R.S.; SILVA, P.H.P.; SOUZA, R.T.; ALMEIDA, S.B.S. **Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Relatório parcial, PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317 / Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco. 2018.

VIANA, H.S.; KOHLER, H.C.; TAVARES, V.P. (Org.). **APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico**. Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 301p. 1998.

VIEIRA, L.C.M. **Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 111p. 2018.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs realizar um estudo sobre recarga aquífera através dos dados gerados durante quatro anos hidrológicos de monitoramento de vazões de cursos d'água estratégicos da área, além do monitoramento de nível d'água de poços de observação. Utilizou-se ainda um método de cálculo de recarga indireta e feita a calibração deste método com aqueles previamente obtidos através das aplicações diretas.

Para a análise da recarga através da separação de escoamentos, foram geradas e validadas as curvas-chave dos seis córregos monitorados. Constatou-se que o número de anos monitorados para se gerar curvas aderentes é um fator preponderante, e recomenda-se neste trabalho um período mínimo de dois anos hidrológicos, e um erro médio quadrado acima de 0,8 para obtenção de curvas-chave satisfatórias e que representem da melhor forma as sazonalidades das vazões e a variabilidade da pluviometria. Foram constatadas recargas alóctones para algumas bacias de alta produtividade, tais como Escrivânia-Gordura e Palmeira-Jaguara, e sugerem que a atual delimitação da APA de Lagoa Santa é insuficiente para representar de fato o sistema hidrogeológico estudado.

Validada as curvas-chaves e os dados de monitoramento gerados, foram aplicados a partir deles dois métodos de estimativa de recarga aquífera através da separação de hidrogramas: o método de deslocamento da curva de recessão de Rorabaugh (1964) que utiliza como base dados diários de vazão, e o método de filtro digital recursivo desenvolvido por Lyne e Hollick (1979) e adaptado e automatizado por Smakhtin (2001) para séries de vazões mensais. O primeiro retornou taxas médias de recarga de 13,55% da pluviometria, e o segundo taxa média de 9,20%.

A partir do método de Rorabaugh (1964), constatou-se que há alta correlação das águas subterrâneas para o sistema, principalmente nas bacias carbonáticas. A relação observada entre o escoamento total obtido pelos hidrogramas, com o excedente hídrico calculado pelo balanço hidroclimatológico de Thorntwaite e Matter (1955) sinaliza a possibilidade de ocorrência de captações, tanto de águas subterrâneas quanto de superficiais, e isso pode acarretar em valores de recarga subestimados.

O segundo método aplicado, por utilizar como dados fonte vazões com periodicidade mensal, notou-se uma nítida suavização entre os valores de escoamento máximos e mínimos. No entanto, quando se aplica o método para um período longo de monitoramento, as reduções das taxas de recarga são amenizadas, e por isso o método retornou taxas similares às calculadas

pelo método anterior. No entanto, deve-se fazer uma ressalva para a aplicação do método em cursos d'água de baixas vazões, ou com períodos curtos de monitoramento.

Foi aplicado ainda o método da Variação de Nível d'Água (VNA) de Healy e Cook (2002), e que retornou a taxa média de recarga de 9,31%, similar àquela obtida pelo método de Lyne e Hollick (1979). Este método permitiu fazer a setorização das taxas espacialmente, e foi constatado que as maiores taxas calculadas foram nos poços localizados na unidade cárstica.

Por fim, este trabalho ainda propôs a aplicação e adaptação de um método de estimativa de recarga indireta através do método APLIS, adaptado neste estudo para representar de forma fidedigna os sistemas carbonáticos de ambiente tropical-úmido e domínios geológicos neoproterozoicos. Realizados os devidos testes de calibração, tanto das tabelas de classificação dos parâmetros, quanto da equação e entrada do método, gerou-se o mapa da taxa de recarga da área, que mostrou ser predominantemente muito baixa, com média geral calculada de 16,47%.

Ao comparar as taxas obtidas por bacia hidrográfica calculadas pelos métodos APLIS, Rorabaugh (1964) e Lyne e Lyne e Hollick (1979), percebe-se que o método APLIS obteve boa aderência em relação aos resultados obtidos através de separação de hidrogramas, o que garante certa confiança na aplicação em outras bacias hidrográficas que não apresentam monitoramento de vazões instauradas, e atesta a importância de se ter um método indireto calibrado para estimativas de recarga em locais de difícil acesso ou em projetos onde não há investimentos para implantação do monitoramento físico.

Foi possível ainda analisar as taxas de recarga separadas por zonas com cobertura de solos, áreas de depressões cársticas e de afloramentos rochosos, e esta separação foi crucial para o melhor entendimento das relações de escoamento sem que a média geral da recarga mascarasse as taxas mais altas em regiões específicas e propícias ao escoamento subterrâneo. As regiões de maciços rochosos da área são intensamente fraturadas, o que propicia a infiltração das águas pluviais para o meio subterrâneo. As depressões cársticas, por não apresentarem escoamento superficial, também são zonas onde se espera taxas de recarga mais elevadas. Foi possível ainda observar a relação da recarga por litotipo. Essa análise resultou na observação de taxas maiores para o Membro Lagoa Santa, o que era esperado por ser o sistema cárstico mais evoluído da área. Esta setorização permitiu a análise das recargas em regiões normalmente pouco estudadas, tais como a recarga do aquífero fissural do embasamento cristalino e nas coberturas, que normalmente funcionam como aquíferos suspensos.

A partir dos resultados obtidos pelos métodos, entende-se que é crucial, em qualquer trabalho que pretenda estimar as taxas de recarga, a aplicação sempre de mais de um método para testar sua eficácia em diferentes sistemas aquíferos. É recomendado ainda que seja

realizada a correlação desses valores com a geologia, geomorfologia e os processos de dissolução e formação de estruturas típicas do carste. Além disso, recomenda-se ainda, para o aprofundamento das relações entre água superficial e subterrânea, a aplicação de outros métodos de estimativas diretas, tal qual o balanço de cloreto, estudos envolvendo isótopos para definição de zonas de recarga, e intensificar as análises com traçadores corantes para mapeamento das recargas alóctones da área em bacias estratégicas como Escrivânia-Gordura e Palmeira-Jaguara.

## 6 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A.C.L.S; CHAVES, H.M.L. Estimativa de recarga da bacia do Rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 1123-1129. 2011.
- ALKMIM, F. F.; NEVES, B. B. B.; ALVES, J. A. C. Arcabouço Tectônico do Cráton do São Francisco—Uma Revisão. O Cráton do São Francisco. **II Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, Salvador, Bahia**. 1993.
- ALMEIDA J.C.D.; HERNANDEZ, F.B.T.; FRANCO, R.A.M.; ZACOLER J. L. Medição de velocidade e vazão em cursos d'água: molinete hidrométrico versus método do flutuador. Universidade Estadual de São Paula, Unesp. **Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos**. 2010.
- AMARAL, D.G.P. **Análise do comportamento e desempenho hídrico das depressões cársticas da região da APA Carste Lagoa Santa (MG)**. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 154p. 2018.
- ANA, Agência Nacional de Águas – **Sistema HIDROWEB**, 2022. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 10 mai. 2022.
- ANDERSON, M.A.; WOESSNER, W.W. **Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport**. Academic Press. Inc.: California (USA). 381p. 1992.
- ANDRADE, I.B., AMORIM, J.B. **Mapeamento geológico com ênfase na relação hidráulica entre o complexo granítico-gnáissico com o grupo Bambuí**. Trabalho de Graduação – Universidade Federal de Minas Gerais, 105p. 2018.
- ANDREO B.; VÍAS J.; LÓPEZ-GETA J.A.; CARRASCO F.; DURÁN J.J.; JIMÉNEZ P. Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. **Boletín geológico y minero**, 115(2), 177-186. 2004.
- ANDREO, B.; VÍAS, J.; DURÁN, J.J.; JIMÉNEZ, P.; GETA-LÓPEZ, J. A.; CARRASCO, F. Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. **Hydrogeology Journal**. 16: 911. 2008.
- ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 35(2), 411-424. 1999.
- AULER, A.S. **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst, Brazil**. Msc Thesis, Department Of Geography And Geology, Western Kentucky University, Bowling Green,.110 f. 1994.
- BALBIN-BETANCUR, S. **Contribuição do fluxo de base na vazão de rios em áreas tropicais com alto índice pluviométrico: uma análise para a bacia do rio Atrato, Colômbia**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Meio Ambiente – IGCE, Universidade Estadual de São Paulo, 146p. 2019.

BARBOSA, G.V. Notícia sobre o karst na mata de Pains. **Boletim Mineiro de Geografia**, Belo Horizonte, n. 2 e 3, 3-21. 1961.

BARLOW, P.M.; CUNNINGHAM, W.L.; ZHAI, T.; GRAY, M. **U.S. Geological Survey Groundwater Toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (version 1.0)—User guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data**. US Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. B10, 27 p. 2015.

BATISTA, R.C.B. **Caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo (CNPMS) em Sete Lagoas – MG**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 127 p. 2009.

BERBERT-BORN, M.L.C. **Geoquímica dos Sedimentos Superficiais da Região Cárstica de Sete Lagoas-Lagoa Santa (MG), e os indícios de Interferências Antrópicas**. DEGEO/UFOP. Dissertação de Mestrado. 1998.

BORTOLIN, T.A.; REGINATO, P.A.R.; PRESOTTO, M.A.; SCHNEIDER, V.E. Estimativas de recarga aquífera com uso de filtros digitais em sub-bacias hidrográficas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul. **Scientia Cum Industria**. Caxias do Sul: UCS. Vol. 6, n. 2, p. 21-30. 2018.

CANIE - **Cadastro nacional de informações espeleológicas**, 2019. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>. Acesso em: 12 jan. 2023.

CARDOSO, F. A. **Natural background levels of inorganic elements in the groundwaters of the Lagoa Santa Karst Region, Minas Gerais, Brazil**. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 89p. 2019.

CARNEIRO, F.A. **Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da Embrapa Sete Lagoas, MG, Brasil**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 338 p. 2013.

CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas**. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>. Acesso em: 01 mai. 2023.

CHEN, W.; LEE, C. Estimating ground-water recharge from steamflow records. **Environmental Geology**, v.44, p.257-265. 2003.

CUNHA, V.C.V.; MOURÃO, M.A.A.; COTA, S.D.S. Aplicação do método da flutuação do nível d'água subterrânea para estimativa de recarga no Aquífero Urucuia-São Desidério-BA. **Águas Subterrâneas**. 2016.

DANTAS, J.C.M. **Compartimentação e modelagem hidrogeológica do Sistema aquífero cárstico-fissural da região cárstica de Lagoa Santa**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 71p. 2023.

DE PAULA, R.S. **Modelo conceitual de fluxo dos aquíferos pelíticos-carbonáticos da região da APA Carste Lagoa Santa, MG**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 279p. 2019.

DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, 33(2), 119-133. 2019.

DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M. Method to complete flow rate data in automatic fluviometric stations in the karst system of Lagoa Santa area, MG, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**. 2020.

DE SOUZA, R.T. **Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido**. Tese de doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, P. 223. 2020.

DELIN, G.N., HEALY, R.W., LORENZ, D.L., NIMMO, J.R. Comparison of local-to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. **Journal of Hydrology**, 334(1-2), 231-249. 2007.

DELPOMDOR, F.R.; ILAMBWETSI, A.M.; CAXITO, F.A.; PEDROSA-SOARES, A.C. New interpretation of the basal Bambuí Group, Sete Lagoas High (Minas Gerais, E Brazil) by sedimentological studies and regional implications for the aftermath of the Marinoan glaciation: Correlations across Brazil and Central Africa. **Geologica Belgica**. 2020.

FARFÁN, H.; CORVEA, J. L.; DE BUSTAMANTE, I. Sensitivity analysis of APLIS method to compute spatial variability of karst aquifers recharge at the National Park of Viñales (Cuba). **Advances in research in karst Media**, 19-24. 2010.

FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. **Karst Geomorphology and Hydrology (Vol. 601)**. Unwin Hyman, London, 601p. 1989.

GALVÃO P.; HIRATA R.; CONICELLI B. Estimating groundwater recharge using GIS based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. **Environmental Earth Sciences**, 77(10): 398. 2018.

GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. **Journal of Hydrology**, 532, 149-162. 2016.

GALVÃO, P.H.F. **Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2015.

GOMES, R.M.D.A. **Modelo hidrogeológico conceitual e análise da favorabilidade hidrogeológica do aquífero cárstico na região urbana de Sete Lagoas–MG**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 113p. 2020.

HEALY, R.W.; COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology journal**, 10(1), 91-109. 2002.

HESS, J.W.; WHITE, W.B. Groundwater geochemistry of the carbonate karst aquifer, southcentral Kentucky, USA. **Applied geochemistry**, 8(2), 189-204. 1993.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Comitês, Portal – Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas**. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-sf5>. Acesso em: 14 ago. 2022.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Meteorológicos**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em 5 mai. 2022.

KARFUNKEL J.; HOPPE, A. Late Proterozoic glaciation in central-eastern Brazil: synthesis and model. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. 65:1-21. 1988.

KOHLER, H. C. **Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa**. Tese de doutorado – Universidade de São Paulo. 1989.

KOHLER, H.C. A Evolução Morfogenética da Lagoa Santa - MG. **Anais 30° Congresso Brasileiro de Geologia**, Recife, 1, 147-153. 1978.

KÖPPEN, W.G., Geiger R. **Klimate der Erde**. Gotha Verlagcondicionadas, Justus Perthes. 1928.

LANDIM, P.M.B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Departamento de Geologia Aplicada – IGCE. Rio Claro: UNESP, 20p. 2000.

LIMA, F.M.F., FONSECA F.H., MATINAGA L.K. **Geologia e hidrogeologia da Bacia Gordura-Escrivânia – MG**. Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 144p. 2016.

LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. **Hydrology for engineers**. New York, McGraw-Hill. 508 p. 1982.

LUCAS, M.C., WENDLAND, E.C. Estimativa de recarga subterrânea a partir de análise da curva de recessão do escoamento de base. **Anais**. 2011.

LYNE, V., HOLLICK, M. Stochastic Time-Variable Rainfall-Runoff Modeling. Institute of Engineers Australia National Conference, Org. Institute of Engineers **Australia National Conference**, p. 89– 93. 1979.

MAGALHÃES C.C.C.; SILVA T.G.A. **Mapeamento hidroestratigráfico dos aquíferos cársticos nos municípios de Matozinhos e Pedro Leopoldo, MG**. Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 96p. 2018.

MARTINS-NETO M.A.; PEDROSA-SOARES A.C.; LIMA S.A.A. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basis from Late Paleoproterozóico to Late Neoproterozóico in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. **Sedimentary Geology**, 141-142: 343-370. 2001.

MENESES, I.C.R.R.C. **Análise Geossistêmica na Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG**. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 187 f. 2003.



MOURÃO, M.A.A.; CRUZ W.B.; GONÇALVES, R.LF. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. **In: Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais**. Belo Horizonte, 327 – 349. 2001.

NATHAN, R.J.; MCMAHON, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water resources research**, 26(7), 1465-1473. 1990.

PACHECO, W.M.N. **Comportamento hidrodinâmico das lagoas da região da APA Carste de Lagoa Santa**. Tese de doutorado. Instituto de Geociências – UFMG. Belo Horizonte, MG. 2023. No prelo.

PEREIRA, S.I. **Modelagem hidrogeológica numérica aplicada à avaliação de cenários de uso de água**. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 127p. 2022.

PESSOA, P.F.P. **Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos Cobertos de Lagoa Santa, MG**. SMARH/UFMG, Belo Horizonte. Tese de Doutorado, 375 p. 2005.

PILÓ, L.B. **A morfologia cárstica do baixo curso do rio Peruaçu, Januária-Itacarambi, MG**. Instituto de Geociências da UFMG, Belo Horizonte. Monografia de Graduação, 80 p. 1989.

PILÓ, L.B. Geomorfologia Cárstica - Revisão de Literatura. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 1, 1, 88-102. 2000.

PILÓ, L.B.; CASTRO, S.S. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú-Carste de Lagoa Santa, MG**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1998.

RIBEIRO, C.G. **Compartimentação dos fluxos do sistema hidrogeológico cárstico do Grupo Bambuí a partir dos isótopos 2h, 18o e 3h na região de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. Belo Horizonte, 269p. 2020.

RIBEIRO, C.G., MEIRELES, C.G., LOPES, N.H.B., ARCOS, R.E.C. **Levantamento Geológico estrutural Aplicado aos Fluxos dos Aquíferos Cárstico-Fissurais da Região da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais**. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Trabalho Geológico de Graduação. 2016.

RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FILHO, A.D.; PADILHA, AV.; CÓRDOBA, C.V. Projeto VIDA: mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Campim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – **Relatório final CPRM**, 2ª ed, escala 1:50.000. 2003.

RISSER, D.W.; GBUREK, W.J.; FOLMAR, G.J. **Comparison of methods for estimating ground-water recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States**. Vol. 5038, US Department of the Interior, US Geological Survey. 2005.

ROLIM, G.S; SENTELHAS, P.C; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Rev. Bras. Agrometeorol**, 6, 133-137. 1998.

RORABAUGH, M.I. **Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow**. International Association of Scientific Hydrology Publication 63, 432–441. 1964.

RUHL, J.F.; KANIVETSKY, R.; SHMAGIN, B.A. **Estimates of recharge to unconfined aquifers and leakage to confined aquifers in the seven-county metropolitan area of Minneapolis-St. Paul, Minnesota** (No. 2). US Department of the Interior, US Geological Survey. 2002.

RUTLEDGE, A.T. **Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records - Update**. US Department of the Interior, US Geological Survey. 1998.

RUTLEDGE, A.T.; DANIEL III, C.C. Testing an automated method to estimate ground-water recharge from streamflow records. **Groundwater**, 32(2), 180–189. 1994.

RUTLEDGE, A.T.; MESKO, T.O. Estimated hydrologic characteristics of shallow aquifer systems in the Valley and Ridge, the Blue Ridge, and the Piedmont physiographic provinces based on analysis of streamflow recession and base flow (No. 1422-B, pp. B1-B58). **US Geological Survey**. 1996.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M. V. B; BUBA, H.; KISHI R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria Aplicada**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, PR. LACTEC. ISBN 85-88519-01-1. 2001.

SCANLON, B.R., HEALY, R.W., COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology journal**, 10(1), 18-39. 2002.

SILVA, J.C.S. **Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG**. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), 303 p. 2003.

SILVA, T.G.A. **Análise da aplicação de métodos europeus de vulnerabilidade intrínseca ao carste tropical da região da APA Carste de Lagoa Santa**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 84p. 2022.

SMAKHTIN, V.U. Estimating continuous monthly baseflow time series and their possible applications in the context of the ecological reserve. **Water Sa**, 27(2), 213-218. 2001.

SMAKHTIN, V.Y. Regional low-flow studies in South Africa. **IAHS PUBLICATION**, 125-132. 1997.

SOARES, L.C. **Estimativa da recarga aquífera na Bacia do Rio Riachão, MG**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 176p. 2012.

SOUZA, R.T. **Vulnerabilidade de aquíferos cársticos com cobertura espessa de solo: metodologia COP-Solo em ambiente tropical úmido**. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2020.

TAPIA, N. **Aplicación de metodologías para la estimación espacial de recarga y conductividad hidráulica**. Caso de los andes centrales en Perú. Universidad de Málaga. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/444778842/Metodologia-APLIS-Peru>. 2011.

TEIXEIRA, G.M.; DE PAULA, R.S.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; PACHECO, W.N.; ANDRADE, I.B. Evaluation of Aquifer Recharge Methods Applied to Fissure and Karst Aquifers of the Lagoa Santa Karst Environmental Protection Area, Brazil. **Hydrological Process**. 2023. No prelo.

TEIXEIRA, G.M.; PENA, M.A.C.; SILVA, P.H.P. **Avaliação da conectividade hidrogeológica entre a região a sudeste de Sete Lagoas e a APA Carste de Lagoa Santa, MG**. Trabalho de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2020.

TEODORO M.I.P.; VELÁSQUEZ L.N.M.; FLEMING P.M.; DE PAULA R.S.; SOUZA R.T.; DOI B.B. Hidrodinâmica do Sistema Aquífero Cárstico Bambuí, com uso de Traçadores Corantes, na Região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, 33(4):392-406. 2019.

THIESSEN, A.H. **Precipitation Averages for Large Areas**. Monthly Weather Review, 39, 1082-1089. 1911.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, 38(1), 55-94. 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TRICART, J. O Karst das vizinhanças setentrionais de Belo Horizonte (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, 4, 3-20. 1956.

UFV - CETEC - UFLA - FEAM. 2010. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acesso em: 27 out. 2022.

UHLEIN A.; TROMPETTE R.R.; ALVARENGA C.J.S. Neoproterozoic glacial and gravitational sedimentation on a continental rifted margin: The Jequitai-macaúbas sequence. Minas Gerais, Brazil. **J South Am. Earth Sci**, 12: 435-451. 1999.

USGS Groundwater Information – **Recession curve, case studies**. Disponível em: [https://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/recession\\_curve/case\\_studies.html](https://water.usgs.gov/ogw/gwrp/methods/recession_curve/case_studies.html). Acesso em: 13 set. 2022.

VARNI, M.; COMAS, R.; WEINZETTEL, P.; DIETRICH, S. Application of the water table fluctuation method to characterize groundwater recharge in the Pampa plain, Argentina. **Hydrological Sciences Journal**, 58(7), 1445-1455. 2013.

VELÁSQUEZ, L.N.M.; ANDRADE, I.B.; RIBEIRO, C.G.; AMARAL, D.G.P.; VIEIRA, L.C.M.; CARDOSO, F.A.; PAULA, R.S.; SILVA, P.H.P.; SOUZA, R.T.; ALMEIDA, S.B.S. **Projeto de adequação e implantação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas em áreas com cavidades cársticas da Bacia do Rio São Francisco aplicado à**

**Área Piloto da APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais.** Relatório parcial, PROCESSO FUNDEP/GERDAU/UFMG n22.317 / Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do São Francisco. Pan Cavernas do São Francisco. 2018.

VIANA, H.S.; KOHLER, H.C.; TAVARES, V.P. (Org.). **APA Carste de Lagoa Santa - Meio Físico.** Volume I. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte, 301p. 1998.

VIEIRA, L.C.M. **Características da Geologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Trabalho Geológico de Graduação, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 99p. 2015.

VIEIRA, L.C.M. **Hidrogeoquímica dos Aquíferos da Região da APA Carste de Lagoa Santa, MG.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 111p. 2018.

WHITE, W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions. **Engineering Geology**, v. 65, p. 85-105. 2002.