



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica**

ESTUDO DAS VAZÕES DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA EM PERÍODOS DE RECESSÃO HÍDRICA

Área de Concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente

Myrla de Souza Batista Vieira

Tese de Doutorado nº 62

Brasília, DF
2021

Myrla de Souza Batista Vieira

**Estudo das vazões do sistema aquífero Urucuia em períodos de
recessão hídrica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Área de concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente.

Orientador: Profº Drº José Eloi Guimarães Campos (IG/UnB)

Coorientador: Profº Drº Eber José de Andrade Pinto (SGB-CPRM/UFMG)

Brasília, DF

2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pela autora

VV658e Vieira, Myrlla de Souza Batista
ESTUDO DAS VAZÕES DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA
EM PERÍODOS DE RECESSÃO HÍDRICA / Myrlla de Souza
Batista Vieira
Orientador José Eloi Guimarães Campos;
coorientador Eber José de Andrade Pinto. --
Brasília, 2021.

217 p.

Tese (Doutorado - Doutorado em Geociências
Aplicadas e Geodinâmica) -- Universidade de
Brasília, 2021.

1. Vazão de Base. 2. Sistema Aquífero Urucuia.
3. Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO). 4.
Uso do solo. 5. Vazão do médio rio São Francisco.
I. Campos, José Eloi Guimarães, orient. II. Pinto,
Eber José de Andrade, coorient. III. Título.

Referência bibliográfica

VIEIRA, M. de S.B. **Estudo das vazões do sistema aquífero Urucuia em períodos de recessão hídrica**. 2021. 217 f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021.

Cessão de direitos

NOME DA AUTORA: Myrlla de Souza Batista Vieira

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Estudo das Vazões do Sistema Aquífero Urucuia em Períodos de Recessão Hídrica.

Autorizo a Universidade de Brasília a reprodução parcial ou total desta tese de doutorado por meio eletrônico, impressão e/ou *download*, para fins de pesquisa e produção científica brasileira. Com obrigatoriedade de citação da obra.

Grau: Doutor Ano: 2021.

Myrla de Souza Batista Vieira

**Estudo das vazões do sistema aquífero Urucuia em períodos de
recessão hídrica**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Área de concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente.

Aprovada em 8 de fevereiro de 2021.

Banca Examinadora:

Profº Drº José Eloi Guimarães Campos (Orientador)
Instituto de Geociências/Universidade de Brasília (IG/UnB)
Presidente da Banca

Drª Lígia Maria Nascimento de Araujo
Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR)
Examinadora externa

Profº Drº Marcos Heil Costa
Universidade Federal de Viçosa (UFV)
Examinador externo

Profº Drº Jeremie Garnier
Instituto de Geociências/Universidade de Brasília (IG/UnB)
Examinador interno

Brasília, DF

2021

DEDICATÓRIA

Ao meu Deus e Senhor da minha vida...
Que me amou e morreu por mim, antes mesmo de eu chegar a este mundo...

Aos meus filhos Diogo, meu Sol, e Drielly, minha Flor...
Que me ensinaram qual é o maior sentido da vida...
Que me mostraram a importância de aproveitar todos os segundos da vida, que passa tão rápido...
Que me ensinaram a amar, independentemente do que ocorrer em nossa vida...

À minha mãe Terezinha, meu exemplo de mulher...
Que, com sua "mente brilhante", sempre estimulou meus estudos, sua herança para mim.
Que me fez compreender a importância de lutar pela minha independência e pelos meus objetivos.

Ao meu pai Maciel Vitorino, meu exemplo de honestidade e bondade...
Que sempre me ensinou a valorizar o meu nome e a família...
Que me apoiou e me incentivou em todos os momentos.

À minha irmã Mylene, minha grande amiga, minha maior companheira...
Que esteve comigo em todos os momentos, fossem eles alegres, tristes ou preocupantes.

Ao meu sobrinho Yuri Davi, meu sempre lindo nenê, mesmo hoje com 14 anos...
Que traz muita felicidade à minha vida e muitas alegrias para nossa família desde a sua chegada.

Ao meu marido Danielson, exemplo de dedicação no trabalho e estudo...
Que sempre me ensinou que aprender nunca é demais...
E como é importante valorizar o trabalho.

Ao meu tio e padrinho, Francisco Xavier de Souza (tio Cié), in memoriam.

Aos meus eternos chefes Silva Lúcia dos Santos (in memoriam) e Achiles Monteiro (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus Pai, pela força, saúde e luz no decorrer de toda a minha vida, em especial durante os últimos quatro anos.

À minha Mãe Maria Santíssima, por abrir todos os meus caminhos.

Aos meus filhos Diogo e Drielly, pela paciência com as minhas ausências, necessárias, para estudo das disciplinas e para escrita desta tese, além de suportarem o meu mau humor durante as fases mais estressantes.

Ao meu esposo Danielson Vieira, por seu incentivo e sua ajuda em várias etapas deste processo.

Ao meu orientador professor doutor Eloi, que acreditou em minha pesquisa, ajudando nas horas difíceis em que a minha paciência se esvaía. Seu incentivo com novas ideias, sempre me guiando durante os últimos quatro anos, não me permitiu perder o foco. Eu não poderia ter tido um professor melhor.

Ao meu coorientador professor doutor Eber, que elucidava as dúvidas, discutindo minhas ideias e me apoiando na fase de elaboração dos artigos e da tese.

À engenheira Adriana Medeiros, chefe da Divisão de Hidrologia Aplicada onde trabalho, que acreditou em mim e defendeu minha liberação para cursar o doutorado.

Ao mestre Dr. Frederico Peixinho, chefe do Departamento de Hidrologia, por acreditar, viabilizar e incentivar a realização desta pesquisa.

Ao Serviço Geológico do Brasil/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SGB/CPRM), em especial ao Departamento de Hidrologia, pelo apoio e incentivo a esta pesquisa, indicando o caminho e a área de estudo a seguir, pois fui selecionada por meio de processo seletivo de demanda induzida da empresa.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Ao padre Vanilson Silva, à Associação Padre Julio Negrizzolo e a Alayde, por todo o suporte espiritual nos últimos três anos.

À amiga geóloga Joseneusa Brilhante, que me ensinou geologia, elucidou muitas dúvidas e, sobretudo, abriu o caminho para realização do doutorado no IG/UnB.

À amiga geóloga Mylene Berbert-Born, que elaborou comigo o projeto de adaptação da pesquisa no Sistema Aquífero Urucuia (SAU) – sem sua ajuda, eu não teria conseguido.

À amiga geóloga Débora Matos, que me apoiou antes e nos primeiros períodos do doutorado.

Aos amigos geólogos Iago Sousa, Marcos Ferreira, Isabelle Serafim e Anderson Dourado, cujo apoio foi fundamental na resolução dos diversos problemas que surgiram no decorrer da pesquisa.

Ao amigo e engenheiro cartógrafo Daniel Moreira, que, além de elucidar várias dúvidas, encontrou soluções tecnológicas e automáticas para a montagem dos bancos de dados, imprescindíveis para análise dos dados, além de todo o suporte para aquisição dos dados dos satélites.

À amiga Daniele Genaro, que me ajudou inúmeras vezes durante a pesquisa com os dados da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), inclusive nos finais de semana.

Ao amigo e engenheiro civil Marcus Suassuna, por seu incentivo antes e no decorrer do doutorado.

Aos amigos Anderson Chagas e Luciano da Hora, pelo apoio, ensinamento e paciência durante a viagem de campo. Eles foram meus grandes mestres nas técnicas de medição de vazão.

Aos amigos Miguel Cidreira e Roberto Paiva, e, em nome deles, a todos os amigos da Superintendência Regional de Salvador do SGB-CPRM (SUREG-SA), pelo apoio durante os anos em que cursei o doutorado.

Aos amigos Francielle e Fabiano Venâncio, por cuidarem de meus filhos nas horas em que eu precisava me dedicar aos estudos e por estarem sempre ao meu lado.

À amiga Mariana Villas Boas, por todo o seu apoio. Sua presença na Câmara Técnica e Científica do SGB-CPRM foi fundamental para a conclusão desta pesquisa.

À minha mãe Terezinha, ao meu pai Maciel, à minha irmã Mylene Batista e ao meu sobrinho Yuri Davy, pelo incentivo e apoio incondicional.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Quanto a vós, sede fortes, não vos acovardeis, pois vosso labor terá sua recompensa.

I Crônicas 15, 7

RESUMO

VIEIRA, M. de S.B. **Estudo das vazões do sistema aquífero Urucuia em períodos de recessão hídrica**. 2021. 223 f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021.

Com esta tese, objetivou-se fornecer subsídios e informações que auxiliem no desenvolvimento de um modelo para estimar as vazões de base que simule o comportamento do Sistema Aquífero Urucuia (SAU) – de importância fundamental na manutenção das vazões dos afluentes da margem esquerda do médio rio São Francisco –, de modo a auxiliar no planejamento hídrico atual e futuro da região em que se encontra inserido o referido sistema, embasando cenários de disponibilidade dos recursos hídricos mais reais e racionais do oeste baiano, área com acelerada expansão da agricultura comercial e onde, no período das estiagens, ocorrem situações críticas do ponto de vista ambiental e também se intensificam os conflitos entre os usuários de água. Para consecução desses objetivos, procedeu-se à análise integrada das características hidrogeológicas dos dados hidrológicos e climáticos, do uso do solo, da recarga e geração da vazão de base. Constatou-se que a água subterrânea extraída a partir dos poços tubulares profundos para irrigação não está interferindo na vazão dos rios, embora, aparentemente, esteja interferindo na reserva não renovável (reserva permanente) do sistema em sua porção confinada. Considerando todo o segmento do médio São Francisco, concluiu-se que até 20% da vazão anual do rio são absorvidos pela zona cárstica representada pelas rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (e da Formação Salitre). Observou-se, também, correlação entre as precipitações mensal e anual e o índice da Atlantic Multidecadal Oscillation/Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO/OMA), cujos resultados mostraram-se estatisticamente significativos, revelando a potencial teleconectividade dos padrões de circulação climática com a precipitação sobre o SAU. O médio rio São Francisco recebe vazão média anual de 1.104 m³/s dos afluentes da margem esquerda, dos quais 73% são constituídos pelo escoamento de base efluente do referido sistema (811 m³/s). Considerando o trimestre mais seco na bacia do rio São Francisco, os afluentes da margem esquerda contribuem com a vazão de 755 m³/s, dos quais 671 m³/s são provenientes da vazão efluente do aquífero. Ou seja, a contribuição do SAU corresponde a 36% da vazão total anual do rio São Francisco. No período mais seco, essa contribuição alcança 53%.

Palavras-chave: Vazão de base. Sistema Aquífero Urucuia. Oscilação Multidecadal do Atlântico (AMO). Uso do solo. Vazão do médio rio São Francisco.

ABSTRACT

VIEIRA, M. de S.B. **Estudo das vazões do sistema aquífero Urucuia em períodos de recessão hídrica**. 2021. 223 f. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2021.

The objective of this thesis was to provide subsidies and information to assist in the development of a model to estimate the base flows that simulate the behavior of the Urucuia Aquifer System (UAS) – of fundamental importance in maintaining the flows of the tributaries of the left bank of the middle São Francisco River. In order to assist in the current and future water planning of the region in which the referred system inserted, basing scenarios of availability of the most accurate and rational water resources in the west of Bahia, an area with the accelerated expansion of commercial agriculture and where, during the dry season, critical situations occur from an environmental point of view and conflicts between water users also intensify. An integrated analysis of hydrogeological characteristics, hydrological and climatic data, land use, recharge, and baseflow generation carried out to achieve these objectives. It found that groundwater extracted from deep tubular wells for irrigation is not yet interfering with rivers' flow, although it interferes with the non-renewable reserve (permanent reserve) of the system in its confined portion. Considering the entire segment of the middle São Francisco, it concluded that up to 20% of the river's annual flow absorb by the karst zone represented by the carbonate rocks of the Bambuí Group (and the Salitre Formation). There was also a correlation between monthly and annual rainfall and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) index, which shown to be statistically significant, revealing the potential teleconectivity of climatic circulation patterns with the precipitation over the UAS. The medium São Francisco River receives an average annual flow of 1,104 m³/s from the left bank's tributaries, of which 73% made up of the outflow of the effluent base of the referred system (811 m³/s). Considering the driest quarter in the São Francisco River basin, the tributaries on the left bank contribute to the flow of 755 m³/s, of which 671 m³/s come from the aquifer's effluent flow. In other words, the contribution of the UAS corresponds to 36% of the total annual flow of the São Francisco River; in the drier period, this contribution reaches 53%.

Keywords: Base flow; Urucuia Aquifer System; Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO); Soil used; The middle São Francisco river flow.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Classificação das secas na região do sistema aquífero Urucuia | 19 |
| 1.2 | Região do oeste do estado da Bahia | 20 |
| 1.3 | Mapa de delimitação espacial preliminar dos subtipos de aquíferos que compõem o sistema aquífero Urucuia | 21 |
| 2.1 | Altimetria da unidade de relevo Chapadão Ocidental da Bahia | 24 |
| 2.2 | Vista da serra Geral de Goiás a partir da região de São Domingos (GO) | 25 |
| 2.3 | Mapa dos subsistemas aquíferos presentes no SAU | 26 |
| 2.4 | Modelo esquemático dos subsistemas aquíferos presentes no SAU | 28 |
| 2.5 | Mapa de isópacas do sistema aquífero Urucuia na porção norte da bacia sanfranciscana | 29 |
| 3.1 | Mapa de solos da região de ocorrência do sistema aquífero Urucuia | 32 |
| 3.2 | Mapas hipsométrico (a) e de declividade (b) da área de ocorrência do SAU | 34 |
| 3.3 | Desnível entre a área do aeroporto de Barreiras e a cidade de Barreiras | 35 |
| 3.4 | Localização de estados e municípios inseridos total ou parcialmente na área de ocorrência do sistema aquífero Urucuia | 36 |
| 3.5 | Série histórica da população dos municípios inseridos no sistema aquífero Urucuia (1970 a 2020) | 38 |
| 3.6 | Expansão agropecuária na região do SAU | 39 |
| 3.7 | Distribuição do crescimento da área ocupada (km ²) na região do SAU | 40 |
| 3.8 | Mapa das áreas de drenagem dos rios cujas nascentes estão na área do SAU | 41 |
| 4.1 | Ciclo hidrológico em representação esquemática | 45 |
| 4.2 | Mapa de isoietas de precipitações médias anuais da região do SAU | 47 |
| 4.3 | Análise das precipitações médias anuais da região de ocorrência do SAU | 48 |
| 4.4 | Análise das precipitações médias mensais da região do SAU | 49 |
| 4.5 | Espacialização das precipitações médias mensais dos meses chuvosos e muito chuvosos, de acordo com a classificação do RAI, na região do SAU | 50 |
| 4.6 | Valores médios de evaporação e evapotranspiração potencial mensal do SAU comparados aos valores precipitados nos períodos 1961-1990 e 1981-2010 | 53 |
| 4.7 | Estatística da disponibilidade de dados fluviométricos | 56 |
| 4.8 | Mapa de localização das estações fluviométricas | 59 |
| 4.9 | Relação entre as áreas de drenagem e os deflúvios mensais médios das estações fluviométricas selecionadas | 60 |
| 4.10 | Vista parcial da PCH Pandeiros | 61 |
| 4.11 | Variação da vazão específica (l/s/km ²) ao longo das décadas por sub-bacia | 65 |
| 4.12 | Mapa da espacialização da vazão de base liberada pelo SAU | 69 |
| 5.1 | (a) Location of the Urucuia aquifer system in central Brazil. (b) Digital elevation model of the Urucuia aquifer system domain. (c) Altimetry of the western Chapadão of Bahia geomorphological domain in different sections | 76 |
| 5.2 | Classification of droughts in the Urucuia aquifer system region | 77 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 5.3 | Analysis of annual precipitations average over the Urucuia aquifer system region (1973 to 2006) | 83 |
| 5.4 | Analysis of annual average precipitations in the Urucuia aquifer system region | 85 |
| 5.5 | Analysis of monthly precipitations average in the Urucuia aquifer system region | 85 |
| 5.6 | Daily hyetograms comparing the precipitation over the Urucuia aquifer system and that observed at "Ponte Alta do Bom Jesus" | 86 |
| 5.7 | Box plot of the ten series of monthly rainfall data for stations installed over the Urucuia aquifer system area | 88 |
| 5.8 | Box plot of the ten series of annual rainfall data for stations installed over the Urucuia aquifer system area | 89 |
| 5.9 | Hyetogram of annual rainfall average at the Urucuia aquifer system | 90 |
| 5.10 | Graph of monthly rainfall in the Urucuia aquifer system region and of the monthly values of the AMO index | 92 |
| 5.11 | Box plot illustrating monthly precipitation for positive and negative AMO index values | 93 |
| 5.12 | Graph of monthly precipitation in the Urucuia aquifer system region and of the monthly values of the PDO index | 94 |
| 5.13 | Graph of monthly precipitation in the Urucuia aquifer system region and of the monthly values of the southern oscillation index and the multivariate ENSO index | 95 |
| 5.14 | Trajectories determined by the HySplit model of the 15 largest daily precipitation events on the Urucuia aquifer system | 97 |
| 6.1 | Mapa das bacias de drenagem dos rios cujas nascentes estão na área de ocorrência do sistema aquífero Urucuia | 112 |
| 6.2 | Estados e municípios inseridos total ou parcialmente na área de ocorrência do SAU | 113 |
| 6.3 | Estatística da disponibilidade de dados fluviométricos da Região Hidrográfica do São Francisco. | 116 |
| 6.4 | Mapa de localização das estações fluviométricas | 117 |
| 6.5 | Mapa de localização dos poços | 118 |
| 6.6 | Série histórica da população residente nos municípios inseridos na área de ocorrência do SAU (período 1970-2010) | 122 |
| 6.7 | Expansão agropecuária na região de distribuição do SAU | 123 |
| 6.8 | Distribuição do crescimento da área ocupada (km ²) pela agricultura na região de ocorrência do SAU | 124 |
| 6.9 | Mapas comparativos de uso e ocupação do solo na região de ocorrência do SAU | 125 |
| 6.10 | Expansão agropecuária na região, definida a partir dos mapas de uso do solo no período de 1985 a 2018 | 126 |
| 6.11 | Desenvolvimento da silvicultura na região de distribuição do SAU | 126 |
| 6.12 | Desmatamento na região definido a partir dos mapas de uso do solo no período de 1985 a 2018 | 127 |
| 6.13 | Evolução da infraestrutura urbana (a) e da mineração (b) na região definida a partir dos mapas de uso do solo no período de 1985 a 2018 | 128 |
| 6.14 | Ampliação da área com uso vinculado à irrigação por pivô central | 129 |
| 6.15 | Espacialização das precipitações médias mensais dos meses chuvosos e muito chuvosos, de acordo com a classificação do RAI, na região de ocorrência e de influência do sistema aquífero Urucuia | 130 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| 6.16 | Hietograma de precipitação média anual na área de distribuição do SAU | 131 |
| 6.17 | Varição do deflúvio ou volume escoado (mm/dia) ao longo das décadas por sub-bacia | 132 |
| 6.18 | Mapa da espacialização da vazão de base liberada pelo SAU | 133 |
| 6.19 | Evolução, ano a ano, da área plantada e com pastagem sobre o SAU, e da vazão nas estações analisadas na bacia do rio Corrente | 139 |
| 6.20 | Evolução, ano a ano, da área plantada, com culturas perenes e anuais, sobre o SAU nas sub-bacias dos rios Grande e Preto | 142 |
| 6.21 | Evolução, ano a ano, da vazão nas estações analisadas na sub-bacia do rio Grande, incluindo seu principal afluente, o rio Preto | 144 |
| 6.22 | Mapa de localização dos 59 poços observados classificados em função do nível do lençol freático | 149 |
| 6.23 | Correlação entre a precipitação mensal média e o nível freático médio mensal observados nos poços no período 2011 a 2018 | 151 |
| 6.24 | Evolução do nível freático do poço fazenda Chaparral em São Desidério (BA) | 152 |
| 6.25 | Evolução dos níveis freáticos médios por faixa de variação da profundidade | 153 |
| 6.26 | Perfis dos poços de monitoramento com níveis freáticos menores que 15 m | 154 |
| 7.1 | Location map of the study area in hydrographic region from San Francisco river | 159 |
| 7.2 | Map of the drainage areas of the São Francisco river tributaries, whose sources are located in the Urucuia aquifer system area | 162 |
| 7.3 | Statistics on the fluviometric data availability | 163 |
| 7.4 | Location map of the fluviometric stations | 164 |
| 7.5 | Graphs of the average annual flow of contribution to the São Francisco river from the sub-basins supplied by the UAS | 172 |
| 7.6 | Graphs of dry season's average flow from rivers with discharge controlled by Urucuia aquifer system | 173 |
| 7.7 | Average long-term flows and base flow, observed in 13 stations installed in the middle São Francisco river channel | 174 |
| 7.8 | Average long-term flows, defined for 10-year periods for 13 stations installed in the middle São Francisco river channel | 174 |
| 7.9 | Geological map where the stretches of the São Francisco river with a reduced flow are highlighted in red | 176 |
| A.1 | Diagrama unifilar da sub-bacia 21 – rio Paranã (região hidrográfica do Tocantins/Araguaia) | 204 |
| A.2 | Diagrama unifilar da sub-bacia 22 (rios Manuel Alves e do Sono – região hidrográfica do Tocantins/Araguaia) | 205 |
| A.3 | Diagrama unifilar da sub-bacia 34 (rio Parnaíba – região hidrográfica do Parnaíba) | 206 |
| A.4 | Diagrama unifilar da sub-bacia 43 (rio Urucuia – região hidrográfica do São Francisco) | 207 |
| A.5 | Diagrama unifilar da sub-bacia 44 (rio Pandeiros, Japoré e Verde Grande – região hidrográfica do São Francisco). | 208 |
| A.6 | Diagrama unifilar da sub-bacia 45 (rio Carinhanha – região hidrográfica do São Francisco) | 209 |
| A.7 | Diagrama unifilar da sub-bacia 45 (rio Corrente – região hidrográfica | 210 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| | do São Francisco) | |
| A.8 | Diagrama unifilar da sub-bacia 46 (rio Grande – região hidrográfica do São Francisco) | 211 |
| A.9 | Diagrama unifilar da sub-bacia 46 (rio Grande – região hidrográfica do São Francisco) | 212 |
| B.1 | Mapa de localização das estações selecionadas e visitadas na área do sistema aquífero Urucua | 214 |
| B.2 | Nivelamento da bússola do medidor acústico M9 (estação Fazenda Macambira) | 214 |
| B.3 | Medição com medidor acústico M9 a barco com cabo de aço (estação Fazenda Redenção) | 215 |
| B.4 | Referência de nível e réguas (estação Savana) | 215 |
| B.5 | Medição com medidor acústico M9 usando uma ponte (estação Savana) | 215 |
| B.6 | Medição com medidor de vazão Flowtracker (estação Brejo Novo) | 216 |
| B.7 | Nivelamento da seção de medição (estação Brejo Novo). | 216 |
| B.8 | Cercado do pluviômetro (estação Rio das Pedras) | 216 |
| B.9 | Medição de sedimentos (estação Sítio Grande) | 216 |
| B.10 | Seção de réguas usada pelos observadores para medição do nível do rio nos horários 7h e 17h (estação Fazenda Bom Jardim) | 217 |
| B.11 | Cercado do pluviômetro e estação automática PCD (estação Formosa do rio Preto) | 217 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|--------|--|
| AD | Anderson-Darling |
| ADCP | Automatic Doppler Current Profiler |
| AMO | Atlantic Multidecadal Oscillation |
| ASAS | Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul |
| CNRH | Conselho Nacional de Recursos Hídricos |
| CONDEL | Conselho Deliberativo |
| CPRM | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais |
| DF | Distrito Federal |
| DNAEE | Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica |
| ENOS | El Niño Oscilação do Sul |
| ENSO | El Niño South Oscillation |
| GRACE | Gravity Recovery and Climate Experiment |
| HRU | Hydrologic Response Unit |
| IAC | Índice de Anomalia de Chuva |
| IG | Instituto de Geociências |
| IOS | Índice de Oscilação Sul |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| IPH | Instituto de Pesquisas Hidráulicas |
| ITZC | Intertropical Convergence Zone |
| MDR | Ministério do Desenvolvimento Regional |
| MGB | Modelo de Grandes Bacias |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço) |
| NRP | Número de Recessão Principal |
| ODP | Oscilação Decadal do Pacífico |
| OMA | Oscilação Multidecadal do Atlântico |
| PCH | Pequena Central Hidrelétrica |
| PDO | Pacific Decadal Oscillations |
| PNRH | Política Nacional de Recursos Hídricos |
| RAI | Rainfall Anomaly Index |
| RHN | Rede Hidrometeorológica Nacional |
| RIMAS | Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas |
| SACZ | South Atlantic Convergence Zone |
| SASA | South Atlantic Subtropical Anticyclone |
| SAU | Sistema Aquífero Urucuia |
| SGB | Serviço Geológico do Brasil |
| SIDRA | Sistema IBGE de Recuperação Automática |
| SIG | Sistema de Informações Geográficas |
| SNGRH | Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos |
| SNIRH | Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos |
| SOI | Southern Oscillation Index |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| SST | Sea Surface Temperature |
| SUDENE | Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste |
| SUREG | Superintendência Regional |
| SWAT | Soil and Water Assessment Tool |
| UAS | Urucuia Aquifer System |
| UFMG | Universidade Federal de Minas Gerais |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |
| UFV | Universidade Federal de Viçosa |
| UnB | Universidade de Brasília |
| URH | Unidades de Resposta Hidrológica |
| ZCIT | Zona de Convergência Intertropical |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------|--|-----|
| 2.1 | Parâmetros hidrodinâmicos obtidos em poços do SAU | 28 |
| 3.1 | Total de municípios inseridos, total ou parcialmente, na área do SAU | 37 |
| 3.2 | Informações por bacia hidrográfica inserida parcialmente na área do SAU | 42 |
| 3.3 | Informações por microbacias e URHs definidas na área do SAU | 44 |
| 4.1 | Informações das séries históricas de 10 estações pluviométricas instaladas sobre a área do sistema aquífero Urucuia | 51 |
| 4.2 | Valores médios de evaporação e evapotranspiração potencial do SAU obtidos pela espacialização dos dados das normais climatológicas dos períodos 1961-1990 e 1981-2010 | 52 |
| 4.3 | Informações das estações pré-selecionadas por afluyente das regiões hidrográficas | 57 |
| 4.4 | Vazão média de longo termo, vazão mínima e máxima, vazão específica e deflúvio médio mensal das estações selecionadas | 58 |
| 4.5 | Análise de continuidade e coerência entre os dados das estações a montante das estações analisadas | 62 |
| 4.6 | Valores característicos da vazão de base média, mínima e máxima por estação | 68 |
| 4.7 | Fração da vazão contribuída pela vazão de base proveniente do SAU nos três passos do filtro digital recursivo no período analisado (1973-2006) | 70 |
| 5.1 | Information from the historical series of ten pluviometric stations installed over the Urucuia aquifer system area | 78 |
| 5.2 | Descriptive statistics of the ten series of annual rainfall data for stations installed over the Urucuia aquifer system area and the series of regional annual total precipitation | 89 |
| 5.3 | Local frequency analysis results of the annual rainfall series from the stations installed over the Urucuia aquifer system area | 91 |
| 6.1 | Parâmetros hidrodinâmicos obtidos em poços do SAU | 105 |
| 6.2 | Informações das estações pré-selecionadas por afluyente da região hidrográfica do São Francisco | 116 |
| 6.3 | Vazão média de longo termo, mínima e máxima e o volume escoado médio das estações selecionadas | 117 |
| 6.4 | Total de municípios inseridos, total ou parcialmente, na área de ocorrência do SAU | 121 |
| 6.5 | Fração da vazão contribuída pela vazão de base do SAU nos três passos do filtro digital recursivo | 134 |
| 6.6 | Dados médios da estação analisada no rio Urucuia | 135 |
| 6.7 | Dados médios das estações analisadas nas sub-bacias dos rios Pandeiros e Japoré | 136 |
| 6.8 | Dados médios das estações analisadas na sub-bacia do rio Carinhonha | 137 |
| 6.9 | Dados das vazões totais e de base das estações analisadas na sub-bacia do rio Corrente | 140 |
| 6.10 | Comparativo das vazões totais com as informações da irrigação por pivô central nas respectivas áreas de drenagem das estações analisadas na sub-bacia do rio Corrente | 141 |
| 6.11 | Dados das vazões totais e de base das estações analisadas na sub-bacia do rio Grande | 143 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 6.12 | Comparativo das vazões totais com as informações da irrigação por pivô central, nas respectivas áreas de drenagem das estações analisadas na sub-bacia do rio Grande | 145 |
| 6.13 | Resumo dos dados obtidos | 147 |
| 7.1 | Information on pre-selected stations by a tributary of the hydrographic regions | 163 |
| 7.2 | Daily mean flow (m ³ /s) average, minimum, maximum, and drainage areas of selected stations | 165 |
| 7.3 | Average long-term flow, low-flow period (quarterly), drainage area, and length of the river stretch upstream the stations installed in the São Francisco river channel and which were used in this study | 165 |
| 7.4 | Flow rate observed at each station installed on the São Francisco river and analyzed in this work | 166 |
| 7.5 | Data determined for fifteen small sub-basins on the São Francisco river left bank, which receive contributions from the Urucuia aquifer system | 169 |
| 7.6 | Data determined for fifteen small sub-basins on the São Francisco river's left margin, which receive contributions from the UAS | 176 |
| B.1 | Estações fluviométricas visitadas em dezembro de 2017 na área do sistema aquífero Urucuia | 213 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | Justificativa e Hipótese | 18 |
| 1.2 | Objetivos | 22 |
| 1.3 | Organização da Tese | 22 |
| 2 | SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA | 24 |
| 3 | ANÁLISE ESPACIAL DA ÁREA SOBRE O SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA | 30 |
| 3.1 | Caracterização Pedológica | 31 |
| 3.2 | Relevo | 33 |
| 3.3 | Uso e Ocupação do Solo | 36 |
| 3.4 | Bacias Hidrográficas | 40 |
| 3.5 | Unidades de Respostas Hidrológicas (URH) | 43 |
| 4 | ANÁLISE HIDROCLIMATOLÓGICA DA ÁREA SOBRE O SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA | 45 |
| 4.1 | Precipitação | 46 |
| 4.2 | Evapotranspiração | 51 |
| 4.3 | Escoamento Superficial | 54 |
| 4.4 | Escoamento Subterrâneo ou Vazão de Base | 65 |
| 5 | A RELAÇÃO ENTRE A OSCILAÇÃO MULTIDECADAL DO ATLÂNTICO E A RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA | 72 |
| 5.1 | Introduction | 73 |
| 5.2 | The Urucuia Aquifer System | 76 |
| 5.3 | Materials and Methods | 78 |
| 5.4 | Results | 82 |
| 5.4.1 | Characterization of precipitation variability in the Urucuia Aquifer System region | 82 |
| 5.4.2 | Annual and monthly rainfall averages over the Urucuia Aquifer System area | 87 |
| 5.4.3 | Comparison of total regional precipitations (annual and monthly) with Climate Indices | 91 |
| 5.4.4 | Comparison of the Urucuia Aquifer System total, annual, and monthly rainfall patterns with meteorological systems | 95 |
| 5.5 | Conclusions | 99 |
| 6 | IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NAS VAZÕES DOS RIOS EFLUENTES DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO | 102 |
| 6.1 | Introdução | 102 |
| 6.2 | Materiais e Métodos | 111 |
| 6.2.1 | Dados multitemporais de uso do solo | 113 |
| 6.2.2 | Dados de chuva | 114 |
| 6.2.3 | Dados de vazão | 115 |
| 6.2.4 | Dados de poços (RIMAS) | 118 |
| 6.2.5 | Vazão de base | 118 |
| 6.3 | Resultados e Análises de Dados | 121 |
| 6.3.1 | Discussões por parâmetro analítico | 121 |
| 6.3.2 | Discussões por sub-bacia | 135 |
| 6.3.3 | Discussões Integradas | 145 |
| 6.3.4 | Análise da recarga do sistema aquífero Urucuia | 148 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 6.4 | Conclusões | 155 |
| 7 | CONTRIBUIÇÃO DOS RIOS EFLUENTES DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA PARA ESCOAMENTO DO RIO SÃO FRANCISCO | 157 |
| 7.1 | Introduction | 158 |
| 7.2 | Material and Methods | 161 |
| 7.3 | Results and Data Analysis | 168 |
| 7.3.1 | Analysis of effluent flow by sub-basin | 168 |
| 7.3.2 | Analysis of the contribution of the Urucuia aquifer system to the São Francisco river | 171 |
| 7.3.3 | Flow continuity analysis on the São Francisco river channel | 174 |
| 7.4 | Conclusions | 178 |
| 8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 180 |
| | REFERÊNCIAS | 187 |
| | APÊNDICE A – DIAGRAMAS UNIFILARES POR SUB-BACIA COM AS ESTAÇÕES PRÉ-SELECIONADAS | 203 |
| | APÊNDICE B – DADOS, FOTOGRAFIAS E MAPAS DA VIAGEM DE CAMPO PARA CONHECIMENTO E RECONHECIMENTO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DA PESQUISA | 213 |
| | APÊNDICE C – DADOS DO ESTUDO/ARTIGO “A RELAÇÃO ENTRE A OSCILAÇÃO MULTIDECADAL DO ATLÂNTICO E A RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA” | CD- ROM |
| | APÊNDICE D – DADOS DO ESTUDO/ARTIGO “IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NAS VAZÕES DOS RIOS EFLUENTES DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO” | CD- ROM |
| | APÊNDICE E – DADOS DO ESTUDO/ARTIGO “CONTRIBUIÇÃO DOS RIOS EFLUENTES DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA PARA O ESCOAMENTO DO RIO SÃO FRANCISCO” | CD- ROM |

1 INTRODUÇÃO

Os eventos climáticos extremos constituem-se, hoje, em uma das principais questões debatidas pela sociedade. Embora ainda haja muitas dúvidas quanto às suas causas e consequências, tais eventos acarretam alterações ambientais que interferem diretamente nas condições de vida e na saúde humana, podendo causar morte, incapacidade e sofrimento à população. Nesse contexto, o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) reconhece três formas principais pelas quais os referidos eventos afetam a vida humana, de acordo com o constante no 5º Relatório, no capítulo sobre saúde humana: impactos, adaptação e cobenefícios (SMITH et al., 2015):

- a) efeitos diretos dos eventos climáticos extremos (como tempestades, inundações, estiagens e secas);
- b) efeitos sobre o meio ambiente (produção de alimentos, qualidade da água e do ar e ecologia de agentes infecciosos);
- c) efeitos sobre os processos sociais (migração de grupos populacionais desencadeada por secas prolongadas, desnutrição e estresse mental).

Nesse cenário, os mais determinantes são os casos relacionados a eventos climáticos extremos, causados por excesso ou falta de precipitação em determinada região por grande período, provocando desequilíbrios hidrológicos importantes.

No que se refere a eventos causados por falta de precipitação, também denominados eventos de recessão hídrica, destacam-se a seca e a estiagem. Esta ocorre em determinado intervalo de tempo, não é permanente e, às vezes, não é tão severa do ponto de vista do ressecamento da atmosfera e do solo, enquanto a seca é caracterizada por ser mais severa e de caráter permanente (CARVALHO, 1988).

1.1 Justificativa e Hipótese

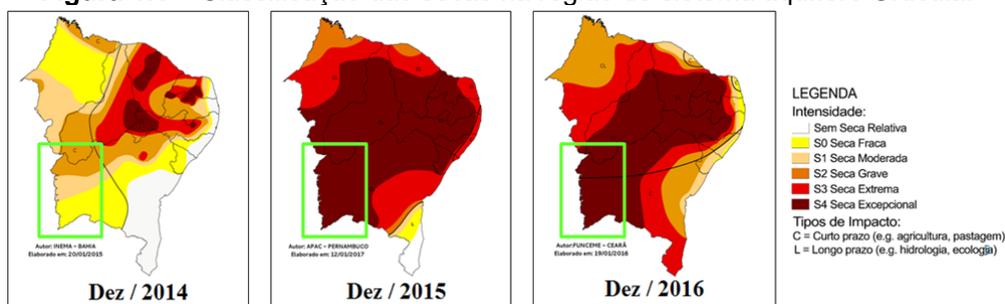
No Brasil, existem áreas onde, periodicamente, ocorrem secas que representam, na maioria das vezes, grandes calamidades, ocasionando sérios danos à agropecuária e graves problemas sociais, razão pela qual o governo brasileiro, por meio na Lei nº 175, de 07.01.1936, reconheceu a existência dessas áreas compostas por diferentes zonas geográficas, com distintos índices de aridez e sujeitas a repetidos eventos prolongados de recessão da precipitação, às quais denominou Polígono das Secas (REBOUÇAS, 1997).

Em 1977, após a Conferência Internacional das Nações Unidas para o Combate à Desertificação, em Nairobi (Quênia), que definiu novas convenções internacionais, o Polígono das Secas passou a ser denominado Semiárido Brasileiro. Atualmente, essa região é delimitada por 1.262 municípios pertencentes aos estados de Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais, de acordo com as resoluções do Conselho Deliberativo (CONDEL) da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) n°s 107, de 27.07.2017 (BRASIL, 2017a), e 115, de 23.11.2017 (BRASIL, 2017b).

Na “Lista de municípios integrantes da região do semiárido (2017)” (BRASIL, 2017c), não estão incluídos todos os municípios da região do oeste do estado da Bahia que são abastecidos pelos rios cuja vazão é mantida pelo Sistema Aquífero Urucuia (SAU) nos períodos de recessão hídrica. Isso se deve ao fato de que, durante os períodos de seca e estiagem, a vazão nos rios é mantida pelo escoamento ou vazão de base, que consiste no escoamento gerado pelos aquíferos, que são formações geológicas subterrâneas, com conexão hidráulica com o corpo hídrico superficial, que possibilitam que a água reservada seja descarregada na rede de drenagem. A liberação natural das águas armazenadas nas redes de canais a montante do trecho considerado como também a evaporação das águas armazenadas em aquíferos são componentes que podem ser desprezadas em situações hidrológicamente críticas (REIS JÚNIOR, 2012).

Nos últimos anos, vem se registrando aumento na intensidade da seca na área, corroborado por mapas do Projeto Monitor de Secas (ANA, 2015, 2016, 2017a), que sugerem modificações no clima da região, que podem ser cíclicas (em função da mudança global) ou resultantes do efeito da expansão agrícola (Figura 1.1).

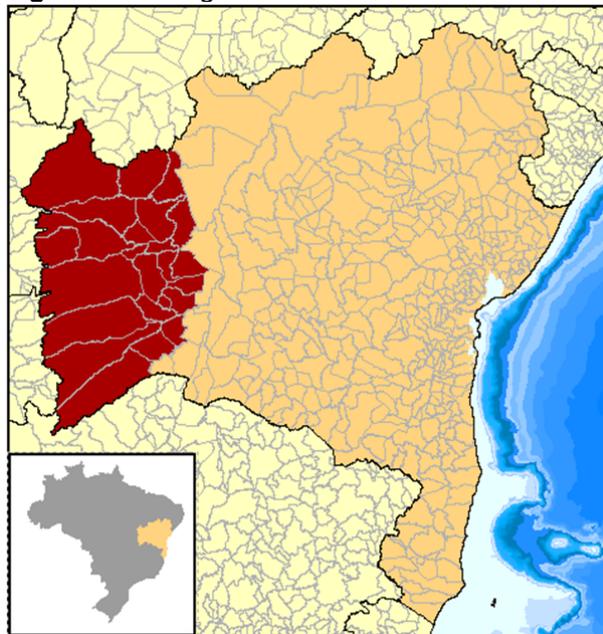
Figura 1.1 – Classificação das secas na região do sistema aquífero Urucuia.



Fonte: ANA, 2015, 2016, 2017a.

Essa região do oeste do estado da Bahia (Figura 1.2) é uma área em franco desenvolvimento, experimentando acelerada expansão da agricultura comercial, que se iniciou há cerca de 30 anos, ao ponto de ser atualmente considerada um dos polos de agricultura irrigada mais importantes do país. Nesse cenário de alta demanda hídrica, observam-se modificações na cobertura vegetal, notadamente a supressão de extensas áreas de cerrado, e o elevado risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Urucuia (SAU) por fertilizantes e defensivos agrícolas, além da inevitável expansão das áreas urbanas localizadas sobre o Chapadão Ocidental da Bahia (PIMENTEL et al., 2011).

Figura 1.2 – Região do oeste do estado da Bahia.



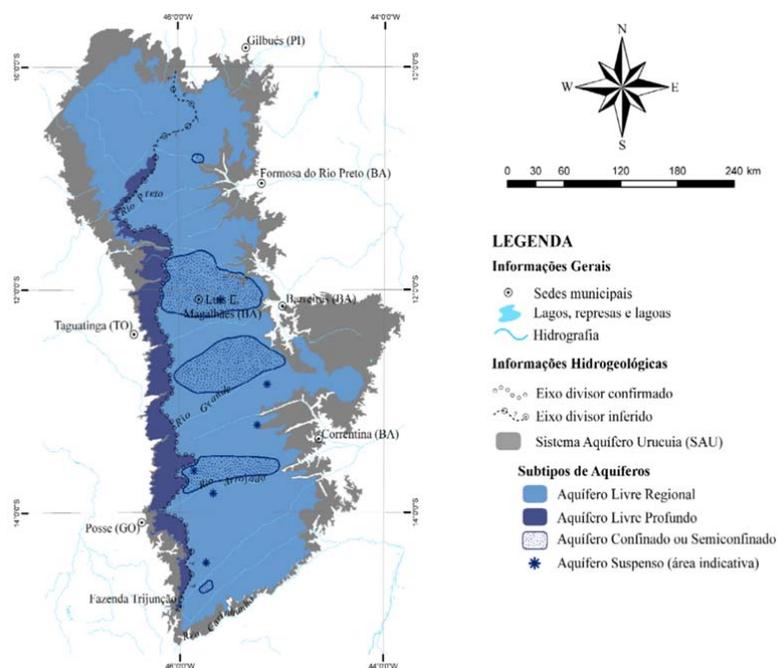
Fonte: Adaptado de:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Lista_de_mesorregi%C3%B5es_e_microrregi%C3%B5es_da_Bahia#/media/Ficheiro:Bahia_Meso_ExtremoOesteBaiano.svg.

Trata-se de um ponto importante de análise, pois as áreas densamente ocupadas ou com forte ritmo de desenvolvimento são especialmente sensíveis aos períodos hidrológicamente críticos, como secas e estiagens, tendo em vista que as maiores demandas e os potenciais conflitos do uso decorrem das condições de escassez. Portanto, nessas regiões, é especialmente importante entender o comportamento hidrológico dos mananciais, predizendo suas reservas e disponibilidades, a fim de embasar políticas e medidas de gestão compartilhada, na perspectiva dos potenciais cenários de mudanças naturais, sociais e econômicas.

No oeste baiano, toda a demanda de recursos hídricos, assim como os potenciais conflitos e impactos relacionados, incide sobre o extenso manancial do Sistema Aquífero Urucuia (SAU), que, conforme Gaspar e Campos (2007), trata-se de um sistema basicamente vinculado às formações Posse (inferior) e Serra das Araras (superior) e composto por subtipos de aquíferos regionais inter-relacionados: aquífero livre regional, aquífero suspenso local, aquífero confinado/semiconfinado e aquífero livre profundo (Figura 1.3). Todo o sistema tem importância fundamental na manutenção das vazões dos afluentes da margem esquerda do rio São Francisco – Corrente, Grande e Carinhonha –, bem como na alimentação de nascentes de tributários da margem direita do rio Tocantins, na borda ocidental da Serra Geral de Goiás (GASPAR, 2006).

Figura 1.3 – Mapa de delimitação espacial preliminar dos subtipos de aquíferos que compõem o sistema aquífero Urucuia.



Fonte: GASPAR, 2006.

Principalmente no período de recessão hídrica, é imprescindível compreender como é gerado o escoamento de base, considerando as geometrias e as inter-relações entre os aquíferos e suas características hidráulicas, como também a hidrodinâmica frente ao clima e aos usos existentes na região. Deve-se considerar, também, tanto os sistemas de fluxo locais quanto os intermediários e regionais.

Assim, devido à importância da vazão de base e à complexidade do SAU, com este projeto objetiva-se contribuir respondendo à seguinte questão: É possível definir um modelo de previsão das vazões de base do SAU, considerando as características hidrogeológicas, os dados hidrológicos e climáticos, além das relações com os subtipos de aquíferos, usos do solo e o clima?

A hipótese é que é possível definir um modelo de previsão das vazões de base, considerando a existência de zoneamentos regionais qualitativos dos recursos hídricos, as interações relativas entre a água superficial, a água subterrânea e os balanços hídricos ao longo da compartimentação geomorfológica, com a possível influência dos diversos subtipos aquíferos interceptados.

1.2 Objetivos

Com este trabalho, teve-se por objetivo geral fornecer subsídios e informações que auxiliem no desenvolvimento de um modelo para estimar as vazões de base que simule o comportamento do Sistema Aquífero Urucuia (SAU), ampliando o conhecimento do funcionamento desse importante reservatório de água subterrânea.

Já os objetivos específicos incluem:

- a) Caracterizar e comparar os escoamentos de base dos rios da região, considerando os respectivos fatores de controle, incluindo os distintos subtipos de aquíferos que compõem o SAU;
- b) Quantificar as mudanças do escoamento de base em função dos usos a que as bacias são submetidas;
- c) Avaliar como o clima, em uma perspectiva de ciclos de maiores amplitudes, pode condicionar a disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas na área delimitada pela ocorrência do Sistema Aquífero Urucuia;
- d) Avaliar o grau de dependência da vazão do rio São Francisco, a partir das descargas de base do Sistema Aquífero Urucuia.

1.3 Organização da Tese

No capítulo 1, procede-se à apresentação do problema, com localização da área de estudo, a relevância e os objetivos da pesquisa.

Já no capítulo 2, destaca-se o estado da arte do conhecimento sobre o Sistema Aquífero Urucuia, que é um dos aspectos mais relevantes e foco desta pesquisa.

No capítulo 3, apresenta-se uma análise espacial da área sobre o Sistema Aquífero Urucuia.

No capítulo 4, tem-se como foco uma análise hidroclimatológica da área associada a esse sistema.

No capítulo 5, com o artigo científico “The relationship between the Atlantic multidecadal oscillation and the Urucuia aquifer system recharge” (A relação entre a oscilação multidecadal do Atlântico e a recarga do sistema aquífero Urucuia), tem-se como objetivo mostrar como os ciclos climáticos afetam a recarga do aquífero Urucuia.

Com o artigo científico apresentado no capítulo 6 – Impactos do uso e ocupação do solo nas vazões dos rios efluentes do sistema aquífero Urucuia na região hidrográfica do São Francisco –, objetiva-se elucidar se a diminuição das vazões dos rios da área ocorre como causa/efeito da expansão da ocupação agrícola da região nas últimas décadas ou se é devida a outros fatores.

No capítulo 7, apresenta-se o artigo científico “Contribution from the Urucuia aquifer system effluent rivers to the São Francisco river flow”, no qual se discute a contribuição da vazão dos rios efluentes do SAU ao longo do trecho do médio São Francisco e o impacto da vazão de base do sistema aquífero na manutenção da vazão desse importante rio brasileiro, buscando fornecer informações mais precisas e espacialmente distribuídas.

Nas Considerações Finais, expõe-se uma discussão integrada e sintética a respeito das mudanças de vazões dos rios efluentes do Sistema Aquífero Urucuia, bem como as principais conclusões da pesquisa.

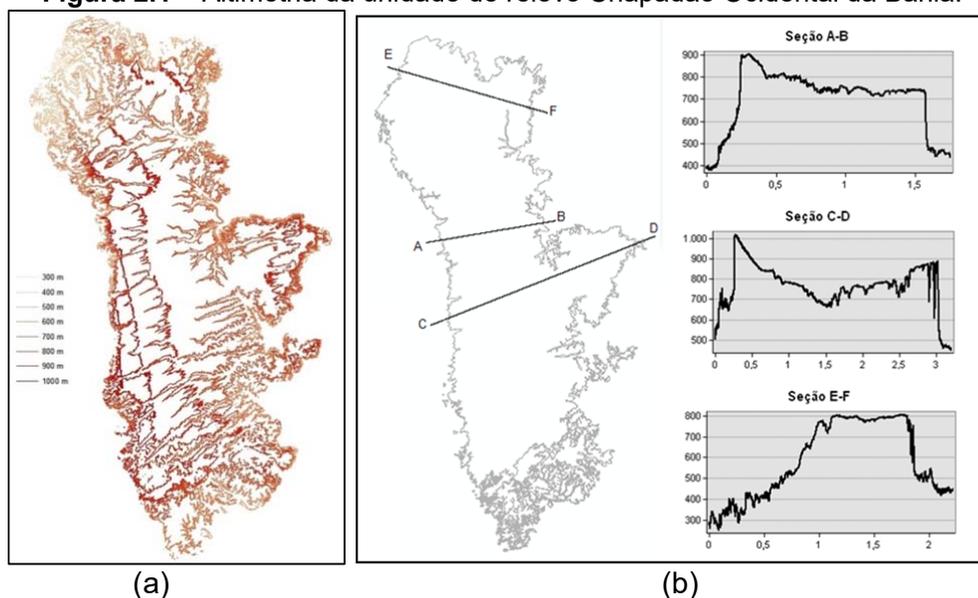
Nas Referências, constam as publicações que embasaram a pesquisa, com as informações indispensáveis à sua localização para consulta dos interessados.

Nos apêndices A, B, C, D, E (esses três últimos apenas no formato digital, em CD-ROMs anexos à tese), são apresentados os dados, os resultados de testes e os resultados parciais desta pesquisa.

2 SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA

O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) é um reservatório de águas subterrâneas situado entre as latitudes 9°25'38" e 16°15'00" e as longitudes 47°41'42" e 43°46'43", sob a unidade de relevo denominada Chapadão Ocidental da Bahia ou do São Francisco (IBGE, 2006), do lado baiano, e Serra Geral do Goiás, do lado goiano, com elevações variando de 300 m a mais de 1000 m em relação ao nível do mar (Figura 2.1). Entretanto, Marques et al. (2020) denominam Planalto de Urucuia à área principal do oeste do estado da Bahia, formada por vasta superfície plana e elevada.

Figura 2.1 – Altimetria da unidade de relevo Chapadão Ocidental da Bahia.



Fonte: Adaptado de USGS, 2014.

Nessa região, o clima é classificado como tropical, com inverno seco, do tipo Aw, segundo Köppen, ou seja, o período chuvoso (excesso hídrico) corresponde ao verão, que ocorre de outubro a abril, quando o volume da precipitação é maior que o da evapotranspiração (GASPAR, 2006). Já o período seco ocorre no período de maio a setembro, quando se estabelece o inverno e a evapotranspiração é maior que a precipitação, ocasionando déficit hídrico (GASPAR, op. cit.). Portanto, no período de maio a setembro, os rios da região são mantidos pelo escoamento ou vazão de base, que, segundo Gaspar (op. cit.), corresponde ao valor médio de $1,35 \times 10^9$ m³/ano, que, em média, é igual a 20% da precipitação (P) e a 91% do escoamento total (E), com base em uma série de dados de 1982 a 2002.

Ainda de acordo com Gaspar (2006), as temperaturas médias variam, anualmente, entre 26° e 20°C; a umidade relativa do ar se situa em torno de 80%, a máxima, no mês de dezembro, enquanto a mínima gira em torno de 50% em agosto.

Em relação à área estimada do SAU, a maioria dos estudos mostra valores com menos de 5% de variação (120.000 km² (BOMFIM; GOMES, 2004); 121.659 km² (COSTA et al., 2008); 125.000 km² (KIANG; SILVA, 2015); 126.000 km² (ANA, 2017b)). Porém, Gaspar (2006) apresentou uma área efetiva igual a 76.000 km². Neste estudo, foi determinada uma área de 121.655 km², que converge com os valores encontrados pela maioria dos autores citados.

Do ponto de vista geomorfológico, o desnível na região alcança até 500 m, com escarpas abruptas e presença de colúvios compondo solos constituídos essencialmente por areias (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Vista da serra Geral de Goiás a partir da região de São Domingos (GO).



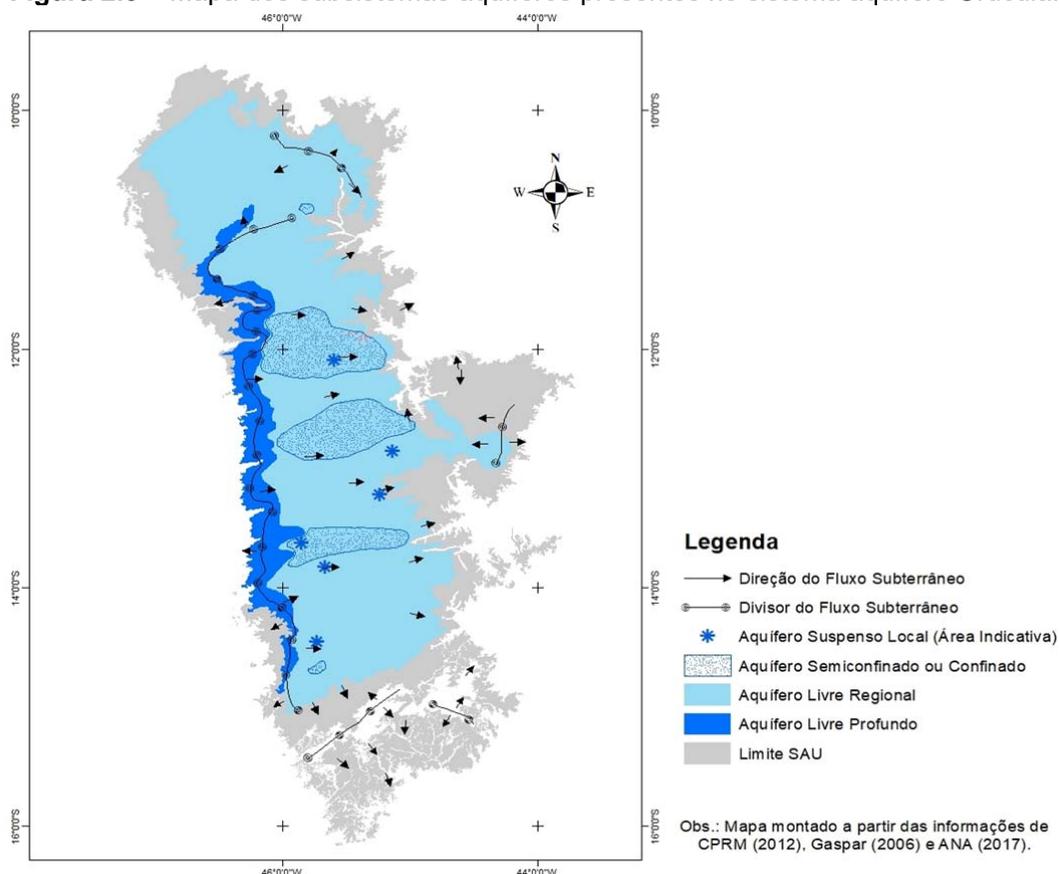
Fonte: José Eloi Guimarães Campos, 2017.

Geologicamente, trata-se de um aquífero de natureza livre, do tipo poroso, de extensão regional, contínuo e regionalmente homogêneo, representado pela cobertura fanerozoica do Cráton do São Francisco, incluindo o Grupo Urucuia e suas coberturas cenozoicas. As principais litologias que compõem esse importante sistema aquífero regional são arenitos de origem eólica e fluvial, com espessuras que alcançam até 600 m nas áreas de depocentro da bacia (GASPAR, 2006).

De acordo com a “Carta geológica do Brasil ao milionésimo” (CPRM, 2004), 97,5% da área do SAU são formados pelo Grupo Urucuia, um arenito constituído por níveis de pelito e, em sua base, arenito conglomerático e conglomerado; 2,5% são formados por Depósitos Aluvionares Recentes, que são areias com intercalações de argila e cascalho e restos de matéria orgânica.

O Sistema Aquífero Urucua é dividido em quatro subsistemas, com características hidráulicas e físicas contrastantes, incluindo espessura da zona vadosa, coeficiente de armazenamento, transmissividade e escoamento de base (GASPAR, 2006) (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Mapa dos subsistemas aquíferos presentes no sistema aquífero Urucua.



Fonte: Adaptado de ANA, 2017b; CPRM, 2012; GASPAR, 2006.

Aquífero livre regional (i)

É o subsistema que ocupa a maior área na bacia. Apresenta nível estático variável desde 4 m a cerca de 50 m, sendo explotado por meio de poços tubulares de cerca de 100 m de profundidade para demandas domésticas.

O fluxo de base desse subtipo de aquífero mantém a perenidade e a elevada vazão específica da rede de drenagem superficial, que, por sua vez, contribui para a regularização da vazão do rio São Francisco, principalmente na época de secas na bacia, que ocorre de forma simultânea em toda a área do alto, médio e submédio curso da bacia.

Aquífero suspenso local (II)

Constitui um subtipo de aquífero desenvolvido em função da presença de níveis silicificados rasos e de extensão limitada, que funcionam como um aquítarde, retardando a drenagem vertical da água, o que permite o acúmulo de água, provavelmente temporário, acima do nível de água regional, podendo, assim, dispor-se acima de outros subtipos dentro do sistema.

Esse subsistema é responsável pela manutenção de lagoas rasas e amplas, além de terras úmidas, principalmente nas cabeceiras das principais drenagens no extremo oeste da bacia. Os níveis silicificados afloram nas bordas leste e oeste da chapada e são interceptados durante a perfuração de poços tubulares.

O escoamento de base desse subsistema é muito sensível ao bombeamento, de forma que os poços tubulares nunca deverão ter seção de filtro em sua porção rasa, sob o risco de o referido bombeamento afetar instantaneamente as vazões em cabeceiras e até causar o secamento de lagoas e áreas úmidas. Esse subsistema é o mais sensível à exploração e ao uso intensivo dos solos para plantio irrigado e até de sequeiro.

Aquífero semiconfinado (III)

A condição de artesianismo desse subsistema de aquífero é controlada por níveis silicificados em profundidade. É comum a presença de vários níveis silicificados no perfil em diferentes profundidades, o que, em alguns casos, pode ampliar o confinamento. Esses níveis funcionam muitas vezes como aquítardes, permitindo uma drenança vertical de diferentes camadas. Schuster et al. (2002) corroboram a presença desse tipo de aquífero a partir de dados de testes de bombeamento, que apresentam valores de coeficiente de armazenamento inferiores a 10^{-3} .

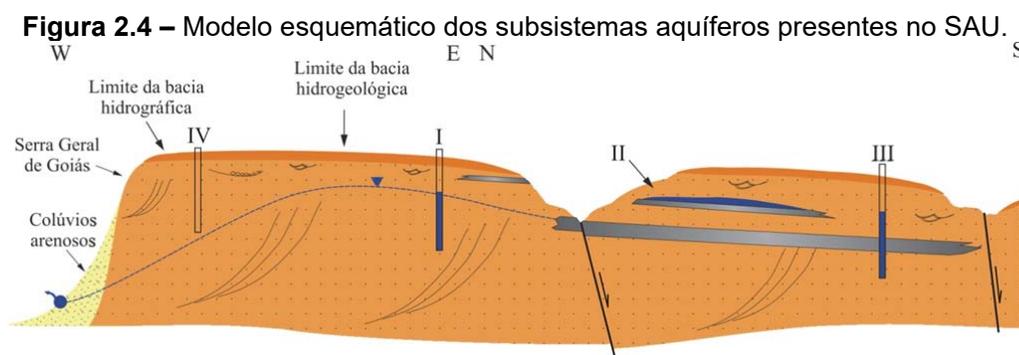
A maior parte dos poços tubulares de alta vazão bombeia água desse subsistema aquífero. O nível potenciométrico nesse subtipo de aquífero é bastante variável. Em um caso observado no município de Luís Eduardo Magalhães, a superfície potenciométrica de um poço, com profundidade maior que 200 m, é mais rasa que a dos demais poços com profundidade da ordem de 100 m.

Aquífero livre profundo (IV)

O contexto desse subsistema é vinculado ao extremo oeste da área de ocorrência do Aquífero Urucuia, distribuído a oeste do eixo divisor de fluxo regional.

Os poços perfurados nesse aquífero apresentam níveis estáticos, em sua maior parte, mais profundos que 100 m. O nível freático regional aumenta progressivamente para oeste, em direção à divisa com os estados de Goiás e Tocantins. Seu escoamento de base alimenta as nascentes da Bacia Hidrográfica Tocantins/Araguaia.

De forma esquemática (Figura 2.4), apresenta-se a distribuição espacial dos quatro subtipos de aquíferos que compõem o Sistema Aquífero Urucua. A seção oeste-leste exibe o contexto dos subtipos aquífero livre regional (I) e aquífero livre profundo (IV), enquanto o perfil norte-sul apresenta os subtipos aquífero suspenso local (II) e aquífero semiconfinado (III). Complementando as informações, apresenta-se uma síntese dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos em poços do referido sistema (Tabela 2.1).



Fonte: GASPAR; CAMPOS, 2007.

Nota: Perfil composto de uma seção EW e NS; a linha tracejada representa a superfície potenciométrica regional.

Tabela 2.1 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos em poços do SAU.

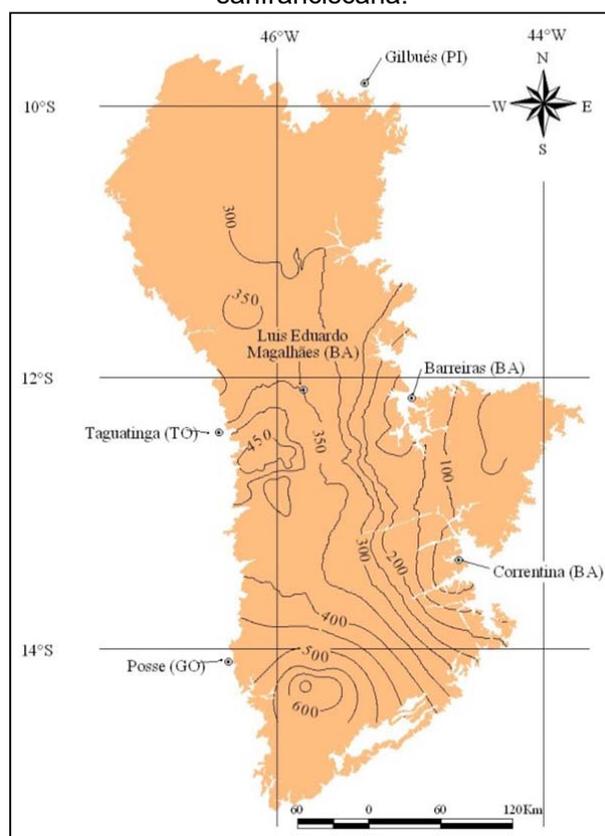
| Parâmetro | | | K (m/s) | T (m ² /s) | S | Q/s (m ³ /h/m) |
|---|----------------|--------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Aquífero | | | | | | |
| Livre regional | Gaspar; (2007) | Campos | $2,4 \times 10^{-7}$ | $4,9 \times 10^{-5}$ | - | 0,46 |
| | | | $1,3 \times 10^{-6}$ | $2,7 \times 10^{-4}$ | - | 2,70 |
| Livre profundo | Gaspar; (2007) | Campos | $3,9 \times 10^{-6}$ | $1,4 \times 10^{-3}$ | - | 13,1 |
| Confinado ou semiconfinado | Gaspar; (2007) | Campos | $2,55 \times 10^{-5}$ | $8,91 \times 10^{-3}$ | $1,01 \times 10^{-4}$ | 13,1 |
| | | | $6,4 \times 10^{-5}$ | $2,5 \times 10^{-2}$ | $1,4 \times 10^{-4}$ | 12,35 |
| | | | $3,8 \times 10^{-5}$ | $1,9 \times 10^{-2}$ | $1,8 \times 10^{-4}$ | 15,18 |
| Dados Obtidos por Outros Autores | | | K (m/s) | T (m²/s) | S | Aquífero |
| Schuster et al. (2002) | | | $1,00 \times 10^{-4}$ | $1,61 \times 10^{-2}$ | $2,6 \times 10^{-4}$ | Semiconfinado |
| | | | $1,08 \times 10^{-4}$ | $1,63 \times 10^{-2}$ | $1,5 \times 10^{-4}$ | |
| Nascimento et al. (2003) | | | $4,05 \times 10^{-3}$ | $1,52 \times 10^{-2}$ | $7,5 \times 10^{-4}$ | Semiconfinado |
| | | | $4,11 \times 10^{-3}$ | $1,69 \times 10^{-2}$ | $3,0 \times 10^{-4}$ | |
| Schuster (2003) | | | $1,61 \times 10^{-2}$ | - | $2,74 \times 10^{-4}$ | Semiconfinado |
| | | | $2,03 \times 10^{-2}$ | - | $5,39 \times 10^{-4}$ | |

Fonte: GASPAR; CAMPOS, 2007.

O mapa de isópacas da porção norte da bacia Sanfranciscana, proposto por Gaspar (2006), indica espessuras variáveis: desde inferiores a 100 m, na porção centro-leste, até 600 m, no depocentro sul (Figura 2.5). Entretanto, tal variação de espessura não é consenso na literatura, pois há autores que consideram espessuras maiores que 1000 m nos depocentros (BOMFIM; GOMES, 2004).

Poços totalmente penetrantes, recentemente construídos na bacia Sanfranciscana, mostram que há variações da espessura. Entretanto, a proposta por Gaspar (2006) parece ser a mais realista.

Figura 2.5 – Mapa de isópacas do sistema aquífero Urucuia na porção norte da bacia sanfranciscana.



Fonte: GASPAR, 2006.

3 ANÁLISE ESPACIAL DA ÁREA SOBRE O SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA

Para avaliar adequadamente a potencialidade hídrica dessa região, é preciso entender a sua diversidade geográfica, que compreende áreas protegidas, urbanas e rurais, com fazendas de pequeno (agricultura familiar) e grande porte (produção agrícola ou pecuária). Nessa área, as águas superficiais e subterrâneas estão intrinsecamente conectadas e são controladas por um sistema de outorga muitas vezes complexo e pouco efetivo: as águas superficiais são outorgadas com base na delimitação da bacia hidrográfica, que pode ser federal ou estadual (em função de sua área abranger ou não mais de um estado), enquanto as águas subterrâneas são apenas de domínio estadual.

A região sobre o Sistema Aquífero Urucuia abrange parte das áreas de cabeceira de três importantes regiões hidrográficas – São Francisco, Tocantins/Araguaia e Parnaíba –, responsáveis pelo abastecimento e desenvolvimento de vários estados, sendo, por isso, referenciada como “berço das águas” na região central do Brasil.

A Região Hidrográfica do São Francisco abrange 77% da área do SAU, que contribui para 28 afluentes na margem esquerda na região do médio rio São Francisco, sendo os rios Grande (sub-bacia 46), Corrente (sub-bacia 45), Urucuia (sub-bacia 43), Carinhanha (sub-bacia 45), Pandeiros (sub-bacia 44) e Japoré (sub-bacia 44) seus principais representantes. Ressalta-se que as maiores áreas do SAU relativas a essa região hidrográfica localizam-se no rio Grande (45.785 km²).

Já a Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia, que compreende 17% da área do SAU, contribui para três afluentes na margem direita do rio Tocantins, que têm grandes áreas de drenagem: Paranã (sub-bacia 21), Manuel Alves (sub-bacia 22) e do Sono (sub-bacia 22). Ressalta-se que, dos 17% da área do SAU, 12% estão inseridos na área de drenagem desse último rio.

Com a menor parte da área do SAU inserida (5%), tem-se a Região Hidrográfica do Parnaíba, que, em seus rios afluentes, recebe uma parcela da descarga do SAU. Os afluentes do rio Parnaíba que nascem nessa pequena área são: Gurgueia, Paraim e Paranaíba, todos inseridos na sub-bacia 34.

Toda essa área está inserida no perímetro de seis estados brasileiros, assim distribuída: 68% na Bahia; 16% em Tocantins; 10% em Minas Gerais; 3% no Piauí; 2% no Maranhão; 1% em Goiás (IBGE, 2017).

Trata-se de uma área complexa, de várias jurisprudências outorgantes, que se encontra em constante modificação, em função de grande expansão agrícola. Para melhor compreensão desse espaço geográfico, analisam-se, a seguir, seus elementos naturais, como pedologia e relevo, e aqueles modificados pela ação humana, tais como uso e ocupação do solo, incluindo a expansão das cidades.

3.1 Caracterização Pedológica

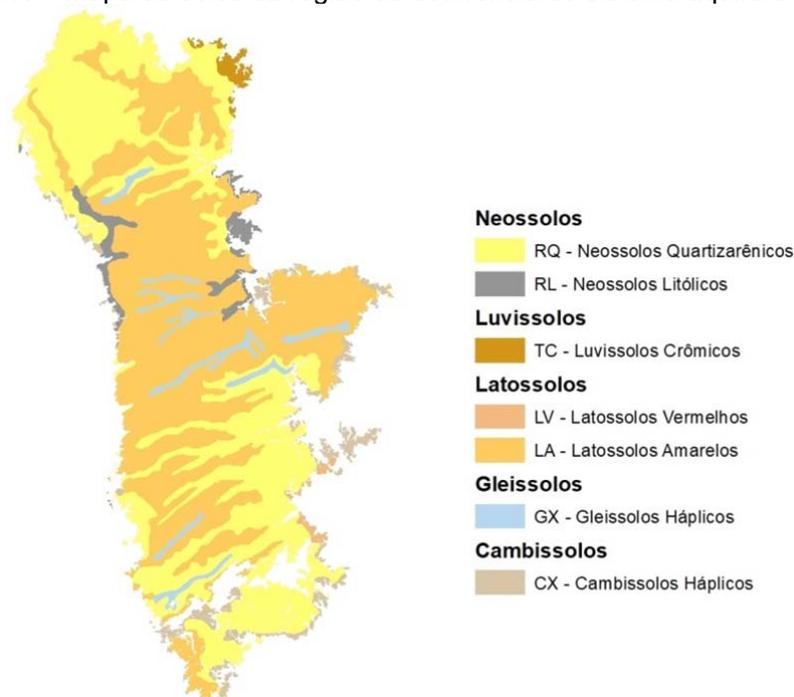
Os solos existentes na região estão apresentados na Figura 3.1, elaborada a partir dos dados vetoriais do mapeamento de solos, realizado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, na escala: 1:5.000.000, e disponibilizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (SANTOS, H.G. et al., 2011).

A parte predominante dos solos da região é classificada como Neossolos Quartzarênicos (40,6%), que são solos sem contato lítico dentro de 50 cm de profundidade, apresentando textura arenosa ou areia franca em todos os horizontes até, no mínimo, 150 cm a partir da superfície do solo; são essencialmente quartzosos, apresentando, na fração areia, 85% ou mais de quartzo, calcedônia, opala e praticamente ausência de minerais primários alteráveis, por isso eram chamados de Areias Quartzosas (SANTOS, H.G. et al., 2018). Esses solos apresentam pequena capacidade de retenção de água e requerem adubação, correção de acidez (calagem) e de excesso de alumínio, podendo necessitar de irrigação e de cuidados contra a erosão (Figura 3.1).

Outro solo dominante na região é o Latossolo (49,7%), que são solos minerais, com pouca diferenciação entre horizontes e cor quase homogênea com a profundidade; são normalmente profundos e bem drenados, coesos, duros ou muito duros quando secos, com característica de acidez. A classe predominante na região, ocupando 49% da área, é o Latossolo Amarelo, que indica a ocorrência de teores de Fe_2O_3 (óxido de ferro) (SANTOS, H.G. et al., 2018). Em função de tais feições químicas, esses solos requerem manejo adequado, incluindo correção da acidez, neutralização do efeito tóxico do óxido de ferro e adubação com fertilizante solúvel.

Os outros 7,1% da área do SAU apresentam solos classificados como Gleissolos (3,2%): solos conotativos de muita água; Luvisolos (0,8%): solos eutróficos, que apresentam argila de alta atividade; Cambissolos (3,1%): solos em formação (transformação incipiente) (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Mapa de solos da região de ocorrência do sistema aquífero Urucuia.



Fonte: Adaptado de SANTOS, H.G. et al., 2011.

Na agricultura, os Latossolos são passíveis de utilização com culturas anuais, perenes, pastagens e reflorestamento. Normalmente, são profundos, porosos, bem drenados, bem permeáveis mesmo quando muito argilosos, friáveis e de fácil preparo. Quando situados em relevo plano a suave-ondulado, como é caso do SAU, facilita a mecanização.

Já os Neossolos são considerados de baixa aptidão agrícola e o uso contínuo de culturas anuais pode levá-los rapidamente à degradação; entretanto, práticas de manejo que mantenham ou aumentem os teores de matéria orgânica podem reduzir esse problema. No caso das culturas perenes, é necessário um manejo com cuidados intensivos no controle da erosão e da adubação, principalmente com nitrato e potássio, cuidando para não ocorrer o perecimento da plantação.

Esses diversos tipos de solos estão sobre o SAU, que, devido às suas feições geológicas, tem reservas permanentes de água na ordem de $3,77 \times 10^{12} \text{ m}^3$ e reservas reguladoras na ordem de $30,78 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$ (GASPAR; CAMPOS, 2007), atuando como nascente dos rios afluentes de três grandes bacias: São Francisco, Tocantins/Araguaia e Parnaíba, o que garante a atratividade da área para agricultura irrigada.

3.2 Relevo

De formação antiga e resultante da sucessão de ciclos climáticos e da ação das forças internas da Terra, o relevo da região é constituído por um grupo de três chapadões (IBGE, 2019a), amparados por litologias areníticas na porção norte da Serra Geral do Goiás (VILLELA; NOGUEIRA, 2011): Chapada das Mangabeiras, Chapadão Ocidental Baiano e Chapadas do Rio Carinhanha, que compõem rebordos estruturais bem evidentes e comandam o sistema morfogenético da região.

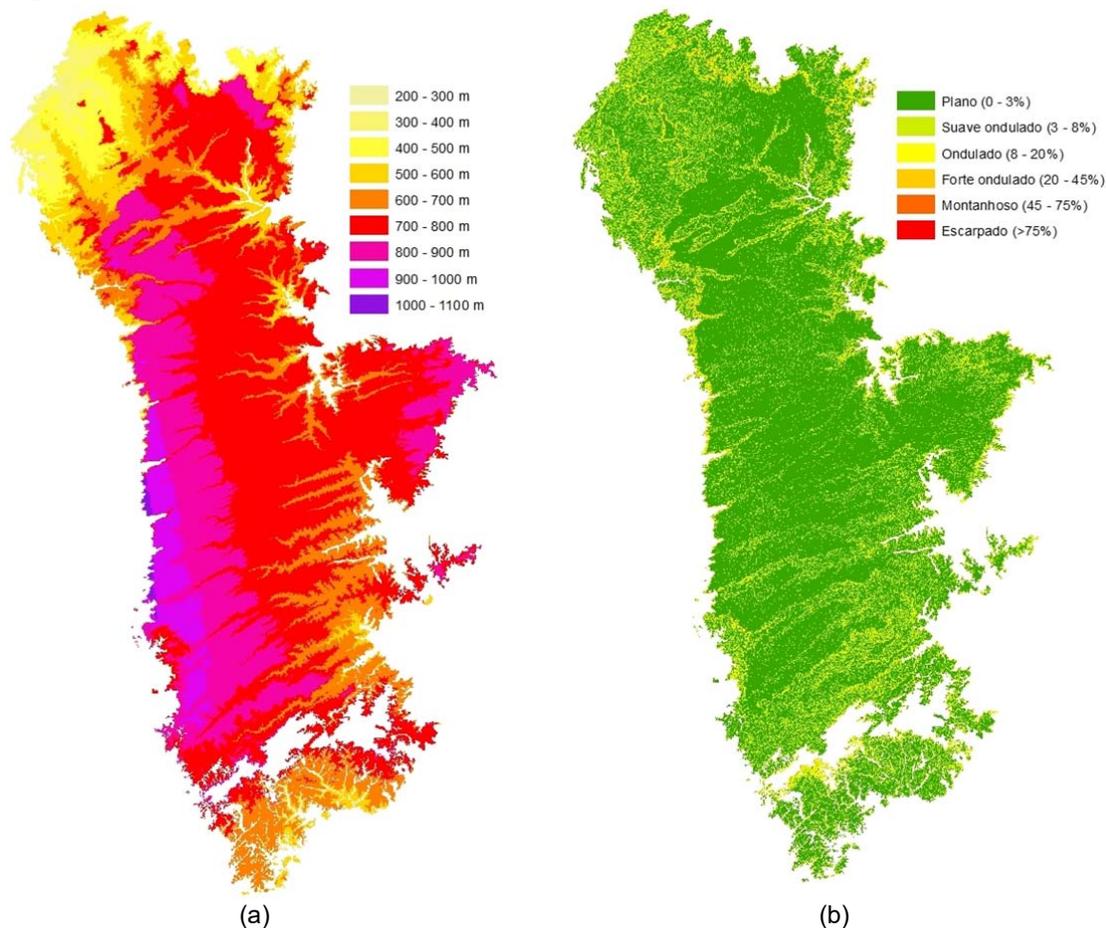
Entretanto, é importante entender a interação desse relevo com outras variáveis ambientais, como rocha, solo, cobertura vegetal, além de clima e hidrologia, como também os efeitos das atividades antrópicas e sua dinâmica atual. O estudo dessa interação será apresentado nos capítulos posteriores, tendo como base a avaliação morfodinâmica da paisagem, que divide os ambientes em até cinco classes de categorias ecodinâmicas (Figura 3.2b) (IBGE, 2009).

No caso da área sobre o SAU, para definir as classes de categorias ecodinâmicas, procedeu-se à geração de um modelo digital de elevação do terreno com os dados topográficos de alta resolução originados pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) da National Aeronautics and Space Administration (NASA), na resolução de 30 m (USGS, 2014). A partir desse modelo digital do terreno, definiram-se as declividades da área, que auxiliaram na avaliação morfodinâmica das cinco classes presentes na área sobre o SAU (Figura 3.2):

- Muito Fraca (Mfa): relevos planos, ou seja, de superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos, com declividades variáveis de 0% a 3%; corresponde a 74,5% da área do SAU.
- Fraca (Fa): caracteriza-se, geralmente, por relevo suave ondulado, com superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros (elevações de altitudes relativas até 50 m e de 50 m a 100 m, respectivamente), apresentando declives suaves, predominantemente variáveis de 3% a 8%; corresponde a 21,7% da área do SAU.
- Moderada (Mo): relaciona-se, geralmente, a relevo ondulado, de superfície com topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros, apresentando declives moderados, predominantemente variáveis de 8% a 20%; corresponde a 2,6% da área do SAU.

- Forte (Fo): traduzida, geralmente, por relevo forte ondulado, ou seja, superfície de topografia movimentada, formada por outeiros e/ou morros (elevações de altitudes relativas de 50 m a 100 m e de 100 m a 200 m, respectivamente) e, raramente, colinas, com declives fortes, predominantemente variáveis de 20% a 45%; corresponde a 1,18% da área do SAU.
- Muito Forte (Mfo): identifica-se, geralmente, por relevos com declividades superiores a 45%, que podem ser montanhosos ou escarpados, mas na área em estudo não existe relevo escarpado, apenas montanhoso; corresponde a 0,02% da área do SAU (o relevo montanhoso é caracterizado por uma superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes, predominantemente variáveis de 45 a 75%).

Figura 3.2 – Mapas hipsométrico (a) e de declividade (b) da área de ocorrência do SAU.



Fonte: Adaptado de USGS, 2014.

Esses valores são compatíveis com os encontrados por Macarrigue et al. (2017): 70% da área com relevo plano (declividade de 0-3%), 24% com relevo suave ondulado (declividade de 3-8%), 3% com relevo ondulado (declividade de 8-20%), 2% com relevo forte ondulado (declividade de 20-45%) e 1% com relevo montanhoso (declividade de 45-75%).

No que diz respeito à altimetria, as elevações da região do SAU variam entre 238 a 1044 m em relação ao nível do mar. Contudo, 80% da área possuem altitudes entre 600 a 900 m e apenas 4% da área apresentam altitudes mais elevadas que 900 m, localizadas na porção extremo oeste da região, e constituem parte do limite entre as bacias hidrográficas do São Francisco e Tocantins/Araguaia. As altitudes abaixo de 500 m estão localizadas na parte norte da região das bacias hidrográficas do Tocantins/Araguaia e Parnaíba.

Em relação à diferença altimétrica entre a área sobre o SAU e aquelas em seu entorno, em alguns pontos a diferença chega a mais de 300 m de altitude, uma vez que a maior parte do entorno desse aquífero (cerca de 70%) está situada em altitudes entre 200 e 600 m.

Por exemplo, observa-se um desnível entre o aeroporto de Barreiras (45°0'39"O; 12°4'52"S), situado sobre o SAU, e a margem do rio Grande (44°59'21"O; 12°7'41"S), no trecho que corta a cidade de Barreiras, localizada na área de entorno do SAU; ou seja, um desnível de 309 m em apenas 5 km de distância, com pontos de declividade de até 32,4% (Figura 3.3). Outro exemplo (vide Figura 2.1) se observa no lado oeste do SAU, na Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia, onde o desnível da região sobre o SAU alcança 400 m em apenas 3,78 km de distância, com pontos de declividade de até 74%.

Figura 3.3 – Desnível entre a área do aeroporto de Barreira e a cidade de Barreiras.



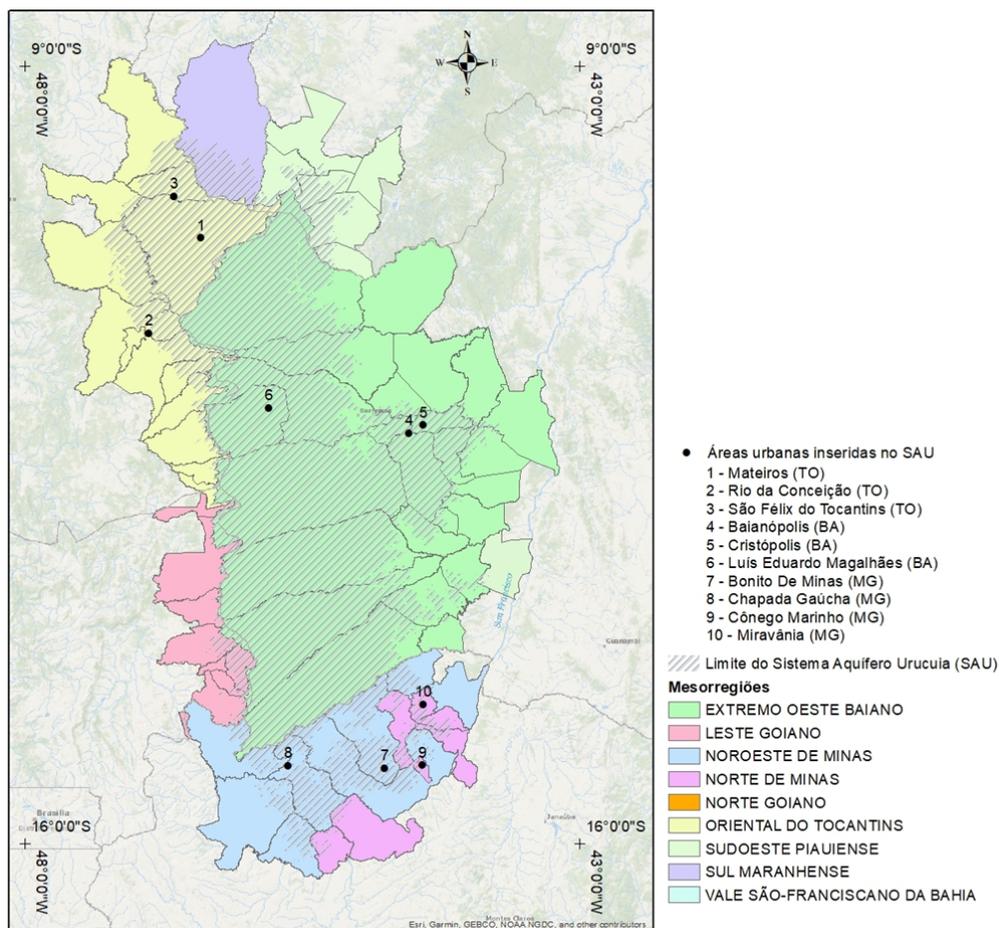
Fonte: Google Earth. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/index.html>>.

O acompanhamento e a avaliação constantes da dinâmica dos desníveis do SAU são fundamentais para a compreensão do funcionamento da recarga/descarga desse aquífero, que se reveste de vital importância para o abastecimento humano, a economia da região e a geração de energia.

3.3 Uso e Ocupação do Solo

Visando a avaliar a evolução do crescimento da população e a expansão cronológica do agronegócio, consideraram-se todos os municípios cujos perímetros estão inseridos, total ou parcialmente, na área do SAU (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Localização de estados e municípios inseridos total ou parcialmente na área de ocorrência do sistema aquífero Urucuia.



Fonte: Adaptado de IBGE, 2017.

As áreas municipais, a localização das áreas urbanas e o perímetro do SAU, em formato vetorial (*shapefile*), foram correlacionadas para avaliar as áreas urbanas

e a porcentagem da área rural que estão inseridas na área de estudo (IBGE, 2017), conforme Resolução n. 2, de 21 de junho de 2016 (BRASIL, 2016).

Para avaliar a produtividade agrícola anual dos municípios inseridos no SAU, utilizaram-se dados disponibilizados no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) (IBGE, 2019b), referentes à área plantada em hectares das lavouras temporárias e permanentes no período de 1974 a 2019.

Com essas informações, foi possível definir se o início e a ascensão do agronegócio nos municípios ocorreram ou não nesse período, além de contribuir na avaliação da forma como ocorreu a expansão desse setor na região.

Em seguida, procedeu-se à análise de consistência por meio da correlação das informações retromencionadas, que serviu também para definir: i) a taxa de crescimento anual na área ocupada pelo agronegócio; ii) a porcentagem das áreas ocupadas pelo agronegócio nos municípios e estados inseridos total ou parcialmente na poligonal de distribuição do SAU.

De acordo com a análise dos dados, 69 municípios estão inseridos, total ou parcialmente, na área do SAU; dentre eles, 10 têm a sede inserida sobre o SAU, considerando as informações dos pontos de localização das sedes municipais e o contorno do SAU (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Total de municípios inseridos, total ou parcialmente, na área do SAU.

| Estado | Nº de Municípios Inseridos | Nº de Sedes Municipais Inseridas | Área Inserida no SAU (km ²) |
|--------------|----------------------------|----------------------------------|---|
| Bahia | 26 | 3 | 82.425 |
| Goiás | 8 | 0 | 1.779 |
| Maranhão | 1 | 0 | 2.708 |
| Minas Gerais | 14 | 4 | 12.495 |
| Piauí | 6 | 0 | 3.377 |
| Tocantins | 14 | 3 | 18.875 |
| Total | 69 | 10 | 121.659 |

Fonte: Elaborado por Myrlla de S.B. Vieira, 2020.

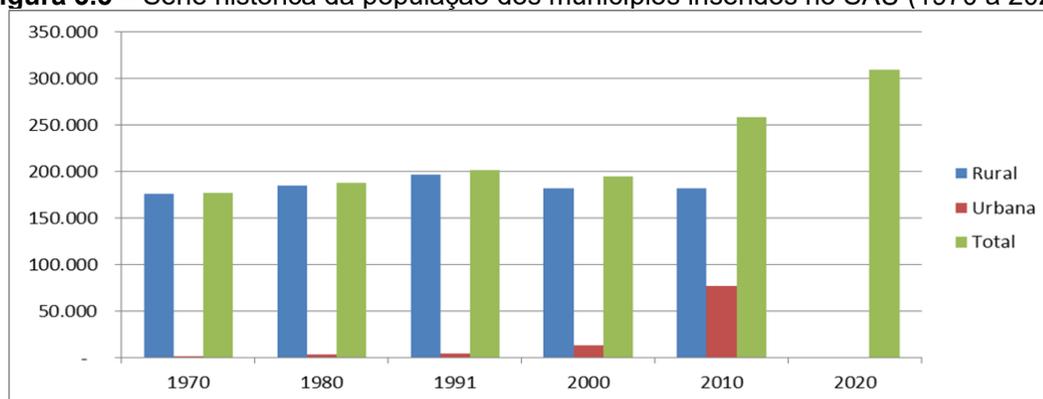
Ressalta-se que o estado da Bahia tem a maior quantidade de municípios inseridos no SAU, seguido por Tocantins e Minas Gerais, com o mesmo número de municípios (contudo, Minas Gerais tem uma sede a mais inserida no SAU). Observa-se, ainda, que Goiás tem a menor área inserida e nenhuma sede municipal dentro da área.

Em relação à população residente, observa-se que esta tem aumentado progressivamente, quando se comparam os dados do período de 1970 a 2020

(Figura 3.5). Ressalta-se que os dados de 1970 a 2010 foram extraídos do “Censo demográfico 2010: séries temporais” (IBGE, 2012a), enquanto aqueles referentes ao ano de 2020 foram obtidos em “Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2020” (IBGE, 2020).

A população rural tem se mantido constante desde o ano de 2000, enquanto a urbana aumenta constantemente desde 1980, o que demonstra que a população dessa região tem optado por morar na zona urbana (dos próprios municípios ou vizinhos). Entretanto, entre os anos de 2000 e 2010, ocorreu grande aumento da população urbana na região, principalmente devido à emancipação do distrito de Luís Eduardo Magalhães, pertencente até então ao município de Barreiras, criando uma área urbana de aproximadamente 37 km² sobre o SAU. Também se observou crescimento em 2020, devido, principalmente, ao aumento populacional do município de Luís Eduardo Magalhães, que passou de 60.105 habitantes (2010) para 90.162 habitantes (2020), de acordo com o “Censo demográfico: tabela 200” (IBGE, 2012b).

Figura 3.5 – Série histórica da população dos municípios inseridos no SAU (1970 a 2020).



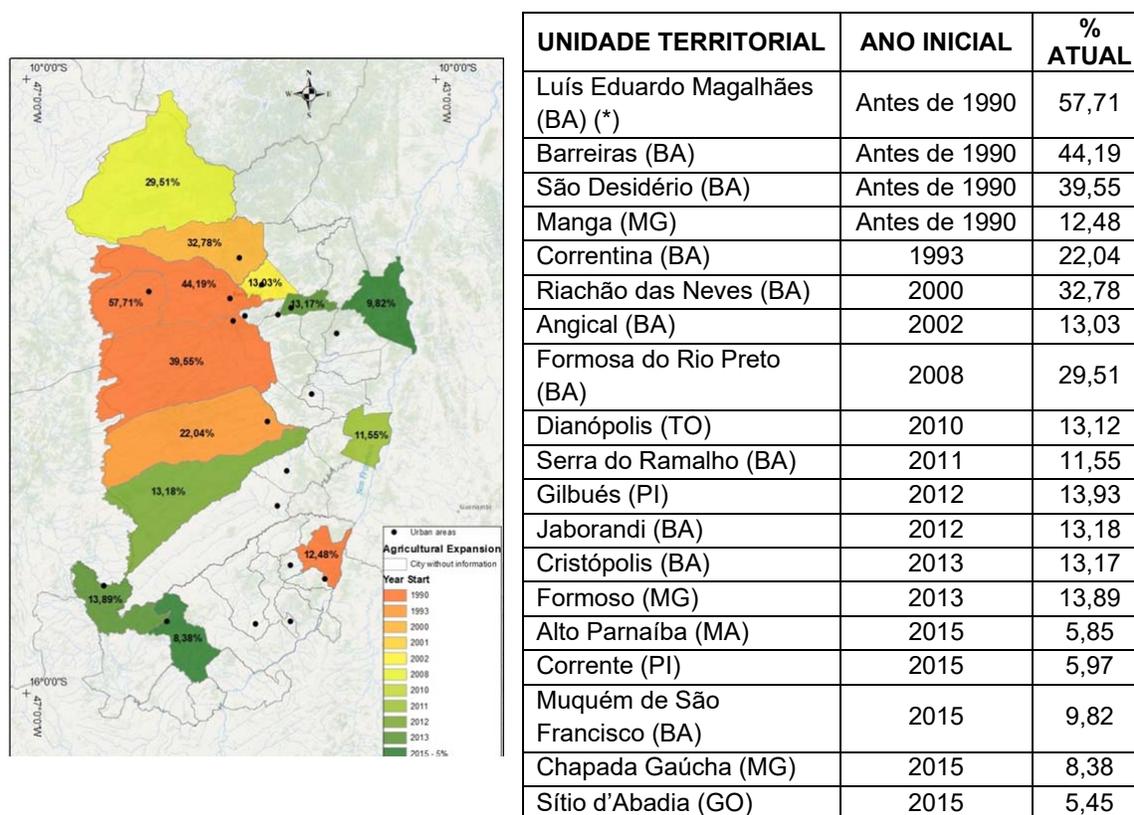
Fonte: IBGE, 2012b, 2020.

A seguir, apresenta-se a evolução da expansão agropecuária na região do SAU, com determinação do ano em que se iniciou o uso agrícola do solo e a porcentagem atual, por município (IBGE, 2017). Observa-se, entretanto, que, em alguns municípios, a agricultura iniciou antes de 1990, como em Barreiras, Luís Eduardo Magalhães e São Desidério (BA). Por outro lado, como a porcentagem é relativamente pequena em Manga (MG), não nos é possível afirmar que a utilização

do solo para fins agrícolas nesse município tenha se iniciado antes ou após 1990. Constatou-se, ainda, que alguns municípios iniciaram a produção agrícola depois do ano 2000, mas já contam com porcentagem maior da área ocupada com o plantio (Figura 3.6).

A agricultura no município de Luiz Eduardo Magalhães, só aparece nos dados a partir de 2001, porque sua emancipação ocorreu em 2000. Entretanto, a área foi uma das primeiras a ser utilizada na agricultura. Anterior a sua emancipação, a área pertencia ao município de Barreiras, por isso entende-se que a agricultura iniciou antes de 1990.

Figura 3.6 – Expansão agropecuária na região do SAU.

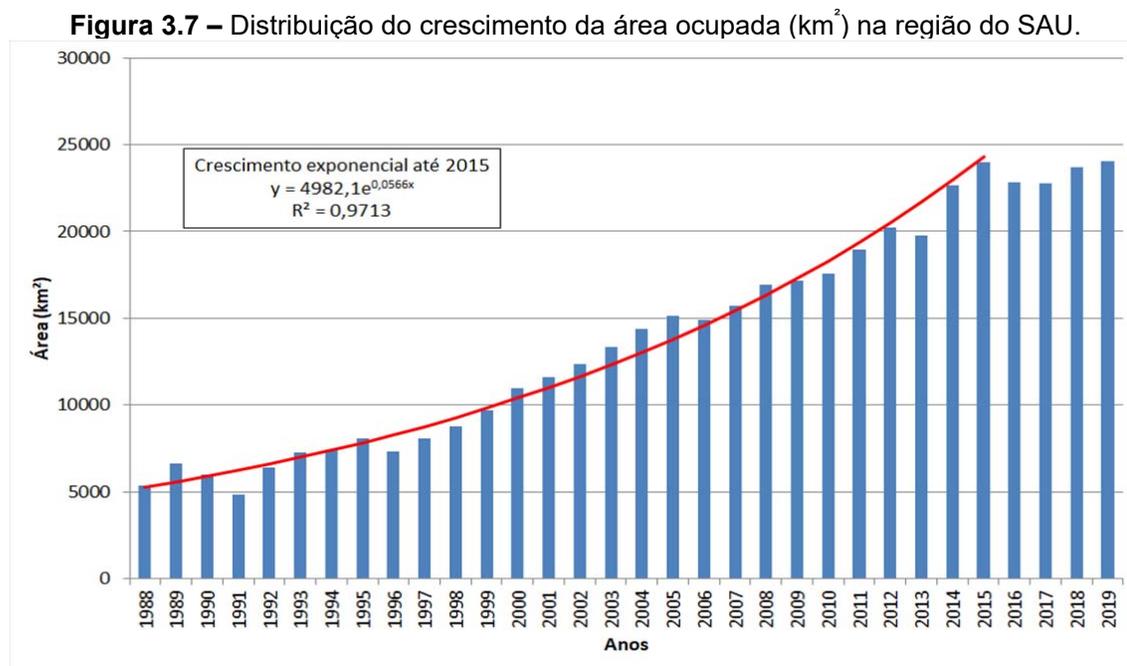


Fonte: IBGE, 2017.

Nota: (*) O município de Luís Eduardo Magalhães foi um dos primeiros a ser utilizado na agricultura. Entretanto, ele só consta nas tabelas do IBGE/SIDRA a partir de 2001, porque a sua emancipação ocorreu em 2000. Antes disso, a área pertencia ao município de Barreiras (que teve sua agropecuária iniciada em 1990).

A espacialização dessas informações levou à conclusão de que a expansão agrícola nessa área começou pelo centro-oeste da região do oeste baiano, no sentido centro-leste, direcionando-se depois para o sul e, após o ano de 2000, no

sentido norte (Figura 3.6). Nesse cenário, o crescimento da área ocupada pela agricultura aumentou exponencialmente entre os anos de 1990 e 2014, com taxa de crescimento anual igual a 9% (Figura 3.7).



Fonte: Elaborado por Myrlla de S.B. Vieira, 2020.

3.4 Bacias Hidrográficas

De acordo com a Lei n. 9.433, de 08.01.1997 (BRASIL, 1997), “a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (SNGRH).

Nesse cenário, é fundamental identificar os limites das bacias hidrográficas cujos rios e afluentes recebem contribuição do SAU, devido ao fato de as vazões dos rios terem uma parcela alimentada pelas descargas de água subterrânea e por fluxos provenientes da zona não saturada, que afluem diretamente no canal do curso d’água (SANTAROSA et al., 2018).

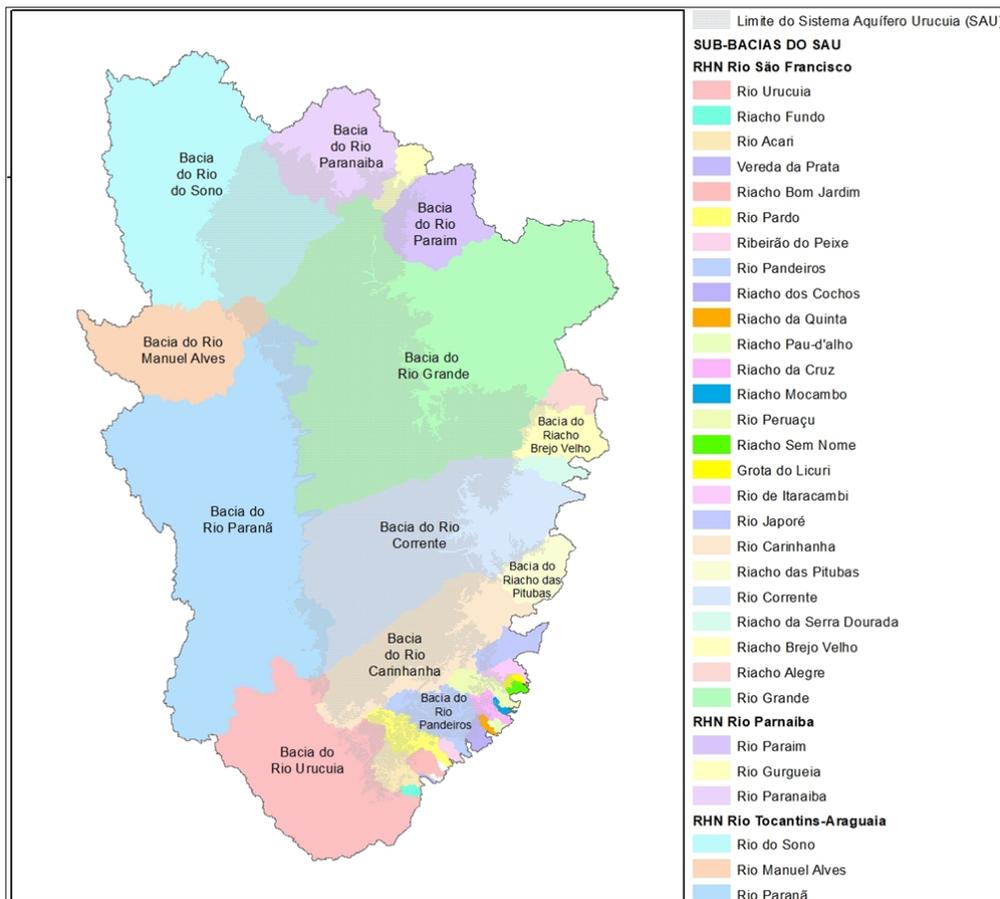
Uma bacia hidrográfica é constituída pela área onde, devido a relevo, desnível e geografia, toda a água que incide sobre ela corre por riachos e rios menores (afluentes) para um mesmo rio principal, localizado em um ponto mais baixo da paisagem. Essa área é separada das demais por um divisor de águas, ou seja, por uma formação do relevo que, em geral, compreende a crista das elevações do

terreno e separa a rede de drenagem.

Na região do SAU, foram delimitadas 33 sub-bacias hidrográficas cujos rios e afluentes recebem contribuições desse aquífero em suas vazões. Destas, 27 pertencem à Região Hidrográfica do São Francisco, três à Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia e três à Região Hidrográfica do Parnaíba, de acordo com a Resolução n. 32, de 15.10.2003, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que dividiu o Brasil em 12 regiões hidrográficas, e que considera “como região hidrográfica o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos” (BRASIL, 2003).

Entretanto, como as áreas das sub-bacias transcendem a área do SAU (Figura 3.8; Tabela 3.2), este trabalho focará no estudo das sub-bacias pertencentes à Região Hidrográfica do São Francisco.

Figura 3.8 – Mapa das áreas de drenagem dos rios cujas nascentes estão na área do SAU.



Fonte: Elaborado por Myrla de S.B. Vieira, 2020.

Tabela 3.2 – Informações por bacia hidrográfica inserida parcialmente na área do SAU.

| Região Hidrográfica | Afluente | Área de Drenagem (km²) | Área do SAU (km²) | Percentual do SAU na Sub-Bacia (%) |
|----------------------------|-------------------------|--|-------------------------------------|---|
| São Francisco | Rio Uruçuia | 25.315 | 2.019 | 7,97 |
| | Riacho Fundo | 219 | 12 | 5,31 |
| | Rio Acari | 1.662 | 911 | 54,82 |
| | Vereda da Prata | 61 | 0 | 0,00 |
| | Riacho Bom Jardim | 770 | 102 | 13,26 |
| | Rio Pardo | 2.205 | 1.227 | 55,65 |
| | Ribeirão do Peixe | 376 | 7 | 1,93 |
| | Rio Pandeiros | 3.942 | 2.759 | 69,98 |
| | Riacho dos Cochós | 573 | 221 | 38,64 |
| | Riacho da Quinta | 195 | 71 | 36,45 |
| | Riacho Pau-d'Alho | 173 | 0 | 0,08 |
| | Riacho da Cruz | 755 | 329 | 43,61 |
| | Riacho Mocambo | 151 | 27 | 17,70 |
| | Rio Peruaçu | 1.435 | 380 | 26,49 |
| | Riacho Sem Nome | 218 | 30 | 13,91 |
| | Grota do Licuri | 211 | 122 | 57,71 |
| | Rio Itacacambi | 685 | 203 | 29,61 |
| | Rio Japoré | 1.891 | 307 | 16,26 |
| | Rio Carinhanha | 16.903 | 11.639 | 68,86 |
| | Riacho das Pitubas | 3.702 | 290 | 7,83 |
| | Rio Corrente | 34.299 | 26.843 | 78,26 |
| | Riacho da Serra Dourada | 1.456 | 62 | 4,24 |
| | Riacho Brejo Velho | 4.432 | 495 | 11,16 |
| Riacho Alegre | 2.036 | 91 | 4,47 | |
| Rio Grande | 77.045 | 45.785 | 59,43 | |
| Parnaíba | Rio Paraim | 8.689 | 1.651 | 19,00 |
| | Rio Gurgueia | 2.069 | 788 | 38,07 |
| | Rio Parnaíba | 12.878 | 4.051 | 31,45 |
| Tocantins/Araguaia | Rio do Sono | 45.558 | 14.811 | 32,51 |
| | Rio Manuel Alves | 14.941 | 1.164 | 7,79 |
| | Rio Paranã | 59.984 | 5.257 | 8,76 |

Fonte: Elaborada por Myrla de S.B. Vieira, 2020.

A maior sub-bacia é a do rio Grande, localizada na Região Hidrográfica do São Francisco, e onde as nascentes de dois grandes rios estão inseridas na área do SAU: Grande e Preto, esse último seu principal afluente. Nela estão inseridos os municípios de Barreiras e Luís Eduardo Magalhães, uns dos primeiros municípios a expandirem a área agrícola e que hoje destinam entre 44% a 58% para o uso desse setor.

Na mesma região hidrográfica, a segunda maior sub-bacia é a do rio Corrente, com área aproximadamente igual à metade da área da sub-bacia do rio Grande. Entretanto, a expansão agrícola nos municípios dessa região só ocorreu a partir de 1993 e, hoje, o uso agrícola compreende apenas 22% da área dessa sub-bacia.

Na Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia, a sub-bacia do rio Paranã recebe contribuição do SAU em várias pequenas sub-bacias dos afluentes da margem direita do rio principal, cujas áreas apresentam muitas variações de declividades, além de vários tipos e usos do solo. Já as sub-bacias dos rios do Sono e Manuel Alves recebem suas contribuições diretamente na calha do rio principal, por eles terem suas nascentes dentro da área sobre o SAU.

Essas variações demonstram a importância de se considerar, na avaliação, o uso do solo, além das divisões em sub-bacias.

3.5 Unidades de Resposta Hidrológica (URH)

As unidades de resposta hidrológica (URH) são regiões hidrológicamente homogêneas dentro da bacia, definidas com base em características físicas tais como elevação do terreno, declividade, tipo e cobertura de solo, incluindo-se, ainda, informações relativas à geologia e topografia, o que implica resposta hidrológica semelhante.

O conceito foi criado por Leavesley (1973), que considera a Hydrologic Response Unit (HRU) a menor unidade espacial do modelo, onde agrupa todos os usos da terra, solos e declives semelhantes dentro de uma sub-bacia com base nos limites definidos pelo usuário (LEAVESLEY et al., 1983; LEAVESLEY; MARKSTROM, 2013). Esse conceito é bastante utilizado até hoje em muitos estudos (BELDRING et al., 2003; DAS et al., 2008; KUMAR et al., 2010), além de sua aplicação em modelos hidrológicos como SWAT (ARNOLD et al., 1998) e MGB-IPH (COLLISCHONN et al., 2006).

O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo de simulação do ciclo hidrológico em escala de bacia hidrográfica, que pode ser usado para simular a qualidade e a quantidade de águas superficiais e subterrâneas, além de prever o impacto ambiental do uso da terra, práticas de gestão da terra e até das mudanças climáticas. Seu desenvolvimento se iniciou na década de 1990 e, desde então, vem

sendo atualizado e amplamente utilizado por diversos pesquisadores (BAZILIAN et al., 2011; FRANCO; BONUMÁ, 2017; KALCIC; CHAUBEY; FRANKENBERGER, 2015; LUO et al., 2012; NATHAN; MCMAHON, 1990; NEITSCH et al., 2011; WHITE; CHAUBEY, 2005).

Já o MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias) foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Constitui-se em um modelo hidrológico distribuído para o estudo de grandes bacias hidrográficas, onde as vazões dos rios são calculadas a partir dos dados de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica (FAN; COLLISCHONN, 2014; FAN et al., 2015).

Na região sobre o SAU, foram delimitadas 1.192 microbacias, em função de relevo e rede de drenagem, respeitando-se a quantidade de URH por microbacia de 2 a 88, totalizando 28.637 URHs (Tabela 3.3). Entretanto, essas sub-bacias têm de ser analisadas separadamente, considerando-se tanto a confluência da rede de drenagem como as particularidades de cada área de drenagem, além dos pontos em que há medição de vazão na região.

Tabela 3.3 – Informações por microbacias e URHs definidas na área do SAU.

| Bacia Hidrográfica | Sub-Bacias (Rio) | Quantidade de Microbacias | Quantidade de URH por Microbacia | | Quantidade Total de URH | Percentual da Área do SAU Analisada nas URHs (%) |
|--------------------|------------------|---------------------------|----------------------------------|--------|-------------------------|--|
| | | | Mínimo | Máximo | | |
| Parnaíba | Gurgueia | 11 | 6 | 40 | 274 | 1 |
| | Paraim | 27 | 8 | 48 | 803 | 1 |
| | Parnaíba | 52 | 6 | 47 | 1056 | 3 |
| São Francisco | Pequenas* | 125 | 3 | 62 | 2719 | 6 |
| | Carinhanha | 98 | 2 | 58 | 2470 | 10 |
| | Corrente | 215 | 2 | 61 | 5002 | 22 |
| | Grande | 253 | 2 | 57 | 5965 | 26 |
| | Preto | 121 | 2 | 56 | 3192 | 12 |
| | Urucuia | 35 | 6 | 61 | 857 | 2 |
| Tocantins/Araguaia | do Sono | 163 | 2 | 47 | 2850 | 12 |
| | Manuel Alves | 15 | 2 | 85 | 536 | 1 |
| | Paraná | 77 | 6 | 88 | 2913 | 4 |
| Total | | 1.192 | 2 | 88 | 28637 | 100 |

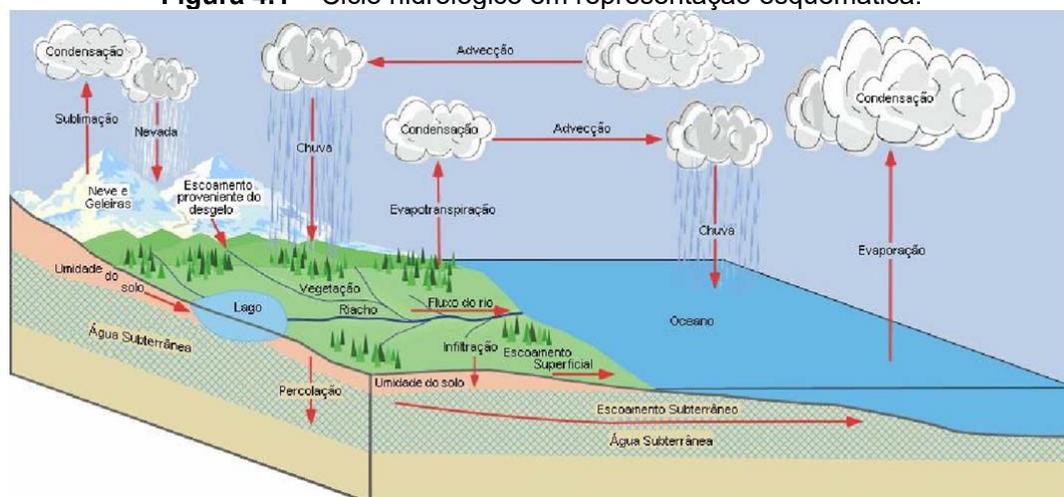
Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Nota: (*) Pequenas sub-bacias são as menores sub-bacias hidrográficas, cujas áreas são menores que 3% da área do SAU e recebem as menores vazões efluentes desse sistema.

4 ANÁLISE HIDROCLIMATOLÓGICA DA ÁREA SOBRE O SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA

A hidrologia é uma ciência que se baseia na observação, no estudo e no tratamento de processos do ciclo da água ou ciclo hidrológico (TUCCI, 2000). O ciclo hidrológico (Figura 4.1) é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado, fundamentalmente, pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. O intercâmbio entre a circulação da água na superfície terrestre (escoamento) e na atmosfera (movimento de massas de vapor pelos ventos ou advecção) ocorre pela evaporação no sentido superfície-atmosfera e pela precipitação no sentido atmosfera-superfície, fechando o ciclo hidrológico (SILVEIRA, 2000).

Figura 4.1 – Ciclo hidrológico em representação esquemática.



Fonte: Adaptado de PIDWIRNY, 2006.

Os processos do ciclo hidrológico são divididos em dois tipos: (i) meteorológicos, que ocorrem na camada inferior da atmosfera, como precipitação, transpiração e evaporação, e que são governados pelas variáveis meteorológicas que influenciam no comportamento termodinâmico da atmosfera, como temperatura, umidade do ar, radiação, pressão, vento, insolação; (ii) hidrológicos, que são responsáveis pela circulação da água no interior e na superfície dos solos, entre as rochas e em superfícies líquidas, como os processos de interceptação, infiltração, percolação, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. Os processos hidrológicos são influenciados diretamente por variáveis ou características físicas da superfície terrestre, como geologia, classes de solos, relevo e uso do solo.

A medição e a avaliação dos processos físicos são pontuais e de complexa extrapolação para grandes áreas, sendo comum, nesses casos, que tais processos sejam modelados. Neste capítulo, são discutidos os processos climáticos e hidrológicos, já que a sua avaliação conjunta resulta na análise hidroclimatológica da região.

4.1 Precipitação

A região do SAU é caracterizada por um período chuvoso de outubro a abril. Nesse último mês, as chuvas começam a diminuir, dando início ao período seco. A seguir, apresenta-se um hietograma (Figura 4.2), no qual foram utilizados os dados de precipitação média mensal no período de setembro de 1973 a agosto de 2006, em 94 estações pluviométricas situadas sobre e ao redor do SAU. Utilizou-se esse período por ele abranger os dados consistidos e disponibilizados no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) (ANA, 2005).

O trimestre mais chuvoso é o de dezembro, janeiro e fevereiro, com média trimestral de 619 mm; o mais seco é o de junho, julho e agosto, com média trimestral de 10 mm, o que mostra a variabilidade climática dessa região.

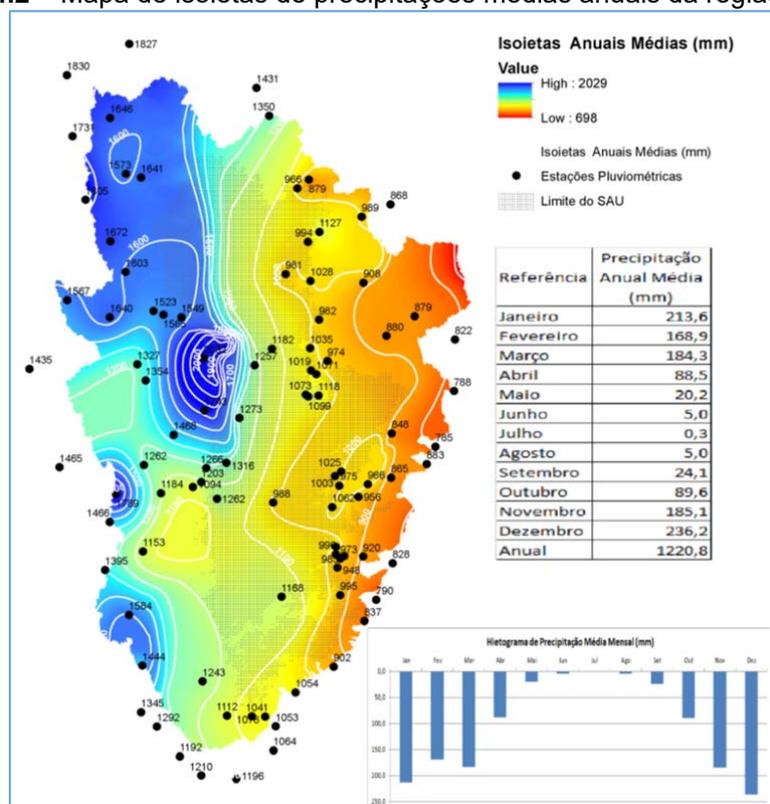
Os dados mais recentes, referentes ao período de setembro de 2006 a agosto de 2018, por terem o *status* “bruto” no SNIRH (ANA, 2005), foram analisados preliminarmente e utilizados na validação e comparação com os dados de vazão, níveis dos poços e uso do solo.

A variabilidade temporal da precipitação foi analisada por meio da espacialização das informações de precipitação das estações da Rede Hidrometeorológica Nacional, no período de setembro de 1973 a agosto de 2006. Tal espacialização foi obtida pela interpolação das informações das 95 estações pluviométricas situadas sobre e ao redor do SAU, visando a criar uma superfície estatística ou *raster*, onde as estimativas de chuva mensal são elaboradas para todas as células para gerar um mapa contínuo. Há diversos métodos de interpolação, mas, neste trabalho, optamos por usar o método do Kriging (ou Krigagem), que, segundo Murara (2019), é o mais utilizado para a espacialização de dados climáticos, uma vez que cria variações mais uniformes, não apresentando grandes variações e suavizando sua representação, já que homogeneiza as informações apresentadas. A análise considerou o ano hidrológico da região

iniciando em setembro e terminando em agosto do ano seguinte, mostrando 12 anos chuvosos e 21 anos secos na região.

O mapa de isoietas de precipitações médias anuais da região do SAU (Figura 4.2), que auxilia na avaliação do comportamento das precipitações médias anuais, mostra que as precipitações na porção oeste do SAU são maiores, com destaque na área da Estação Ponte Alta do Bom Jesus, que apresenta valor maior de precipitação média anual se comparado aos demais valores das estações pluviométricas analisadas. Em contrapartida, observa-se que a porção leste da região do SAU apresenta precipitação com médias anuais mais baixas, atingindo valores inferiores a 1000 mm nas adjacências da área sobre o SAU. Essa variação espacial das chuvas é atribuída ao controle orográfico das precipitações em que as massas de ar são descarregadas progressivamente de oeste para leste. Apresenta-se, ainda, um nicho das maiores precipitações que ocorrem ao redor da Estação Ponte Alta do Bom Jesus, que tem precipitação média anual de 2.033 mm, muito superior à média da região, que é de 1.200 mm. Os valores corroboram com os resultados do Atlas pluviométrico do Brasil (CPRM, 2016).

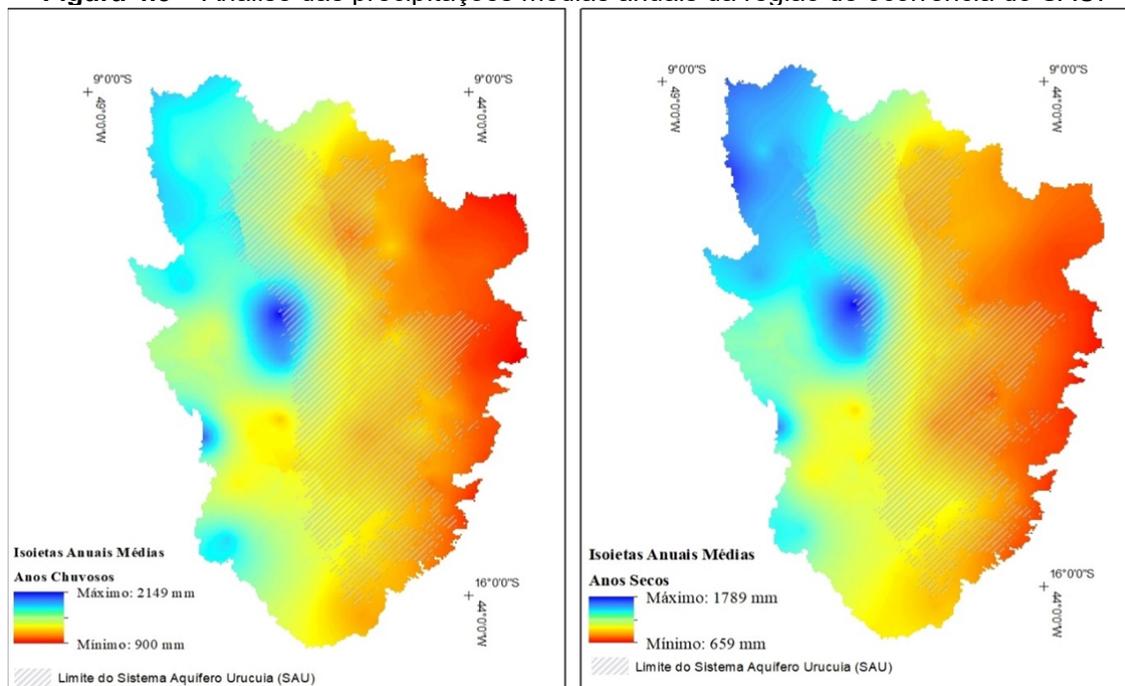
Figura 4.2 – Mapa de isoietas de precipitações médias anuais da região do SAU.



Fonte: Adaptado de CPRM, 2016.

Considerando como anos secos aqueles com precipitação anual abaixo da média histórica e anos chuvosos aqueles com precipitação anual acima da média histórica e a variabilidade da espacialização do volume precipitado nos anos secos e chuvosos, a espacialização das chuvas não apresentou diferença entre anos secos ou chuvosos na região sobre o SAU e em seu entorno (Figura 4.3).

Figura 4.3 – Análise das precipitações médias anuais da região de ocorrência do SAU.



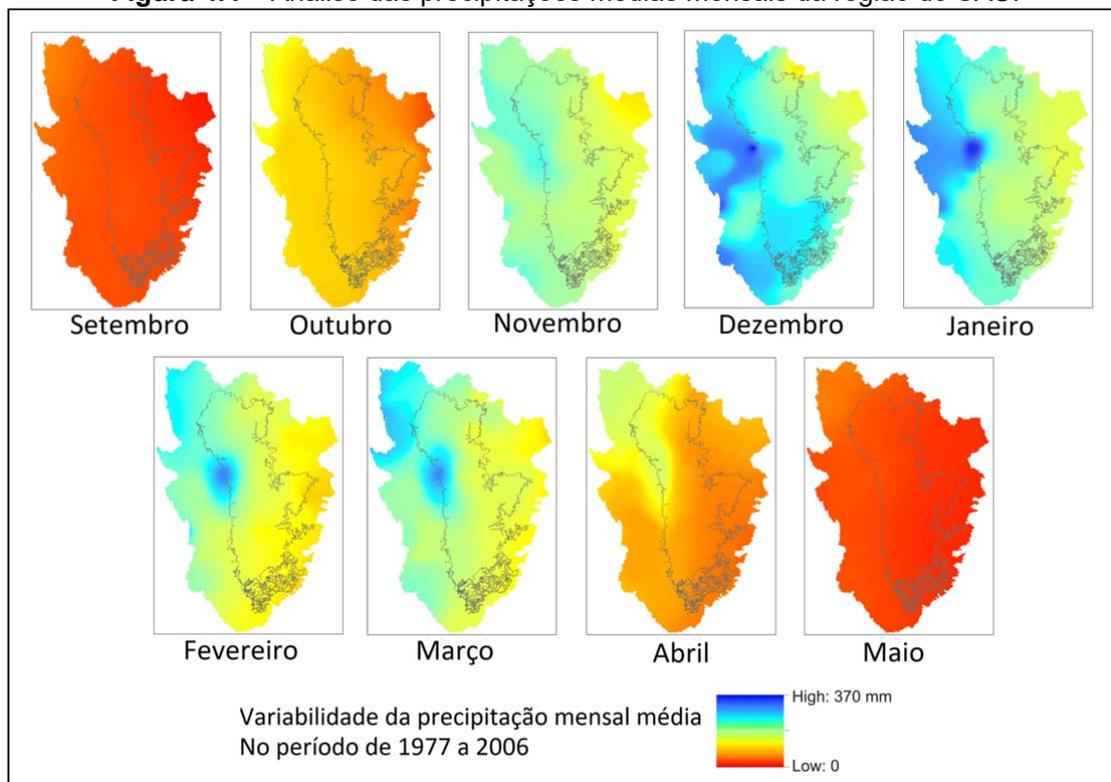
Fonte: Elaborado por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Avaliou-se, ainda, a espacialização da precipitação em todos os meses do ano, observando-se a variabilidade entre os meses chuvosos e secos. Concluiu-se que, no período mais seco (maio-setembro), não há variação na espacialização da chuva na região, ou seja, ela é quase que uniforme sobre o SAU e na área de entorno. Já no período mais úmido (outubro-abril), a região oeste apresenta volume maior de precipitação, principalmente na região no entorno de Ponte Alta do Bom Jesus (Figura 4.4).

A série das precipitações médias mensais permitiu classificar os meses em secos e chuvosos, de acordo com a metodologia do Rainfall Anomaly Index (RAI) proposta por Rooy (1965) e empregada por diversos pesquisadores, tais como Kraus (1977); Souza, Albuquerque e Lopes (2000); Freitas (1998); Araújo, Moraes Neto e Sousa (2009); Cruz et al. (2013); Moraes (2014); Alves e Araújo (2015); Dutta et al. (2015); Noronha, Hora e Silva (2016); Hänsel, Schucknecht e Matschullat

(2016); Cerqueira, Santos e Aquino (2018); Lima et al. (2019) e Surendran et al. (2019).

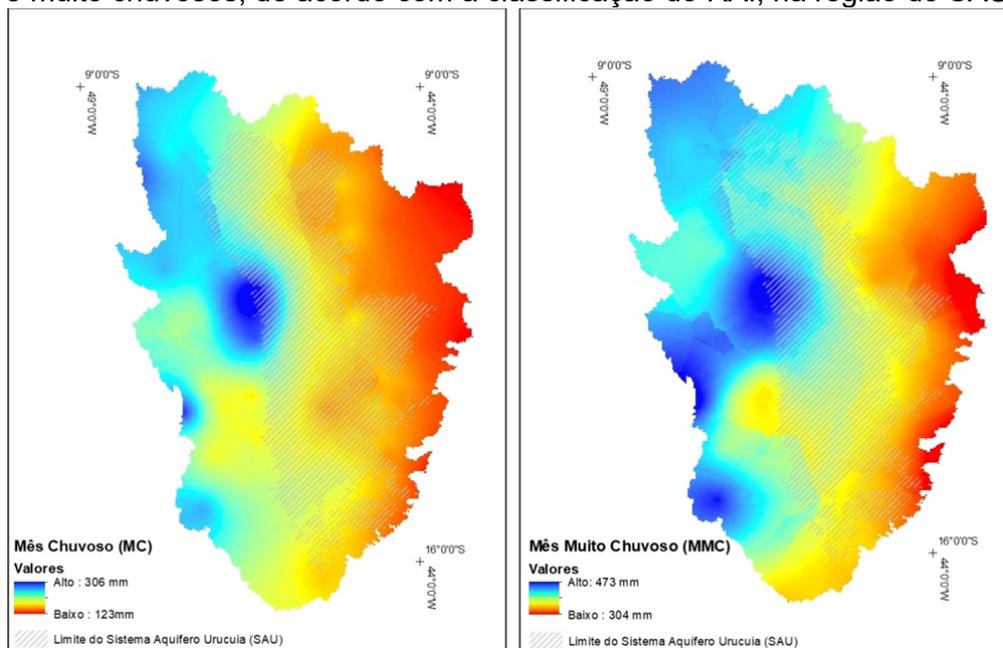
Figura 4.4 – Análise das precipitações médias mensais da região do SAU.



Fonte: Elaborado por Myrla S.B. Vieira, 2020.

A classificação pela metodologia do Rainfall Anomaly Index (RAI)/Índice de Anomalia de Chuva (IAC) permitiu definir que precipitações mensais entre 33,6 a 335 mm são normais na região e definem se os meses são secos (S) ou chuvosos (C) em relação à média. Porém, precipitações mensais iguais ou menores que 33,6 mm definem o mês como muito seco (MS), enquanto precipitações mensais entre 336 e 570 classificam o mês como muito chuvoso (MC); se forem iguais ou maiores que 570 mm, definem o mês como extremamente chuvoso (EC). Tem-se, assim, a seguinte classificação: 150 meses como Muito Seco (MS), 80 meses como Seco (S), 154 meses como Chuvoso (C), 11 meses como Muito Chuvoso (MC) e um mês como Extremamente Chuvoso (EC). Como a variação ocorre nos meses chuvosos, as precipitações dos meses considerados chuvosos, muito chuvosos e extremamente chuvosos foram espacializadas, confirmando-se a concentração em torno da Estação Ponte Alta do Bom Jesus (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Espacialização das precipitações médias mensais dos meses chuvosos e muito chuvosos, de acordo com a classificação do RAI, na região do SAU.



Fonte: Elaborado por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Tais informações comprovam a importância de se analisarem os dados da série de dados pluviométricos para investigar a possibilidade de detecção de nexos entre os sistemas meteorológicos e as características da precipitação, principalmente volume e intensidade, com vistas a definir padrões de precipitações que ajudem a compreender melhor essa variabilidade climática e explicar esse nicho de maiores precipitações.

Dessa forma, procedeu-se à avaliação estatística de todas as estações que medem a chuva diretamente sobre o SAU. Inicialmente, foram obtidas as séries de precipitação média mensal a partir das séries históricas diárias das 10 estações pluviométricas instaladas na área de distribuição do Sistema Aquífero Urucua (Tabela 4.1). Para essas séries, uma análise estatística descritiva simples foi realizada para descrever, avaliar e resumir os dados. Em seguida, procedeu-se à definição das séries de dados de precipitação anual de cada estação, como também das séries de precipitação mensal regional e anual regional representativas da área.

Tabela 4.1 – Informações das séries históricas de 10 estações pluviométricas instaladas sobre a área do sistema aquífero Uruçuia.

| Código | Nome | SB | Município/UF | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|----------|------------------------|----|--------------------------|----------|-----------|--------------|
| 01145013 | Ponte Montante Serafim | 46 | Barreiras/BA | -11.8961 | -45.6119 | 713 |
| 01245014 | Fazenda Johá | 46 | Barreiras/BA | -12.1256 | -45.8108 | 725 |
| 01245015 | Roda Velha | 46 | São Desidério/BA | -12.7653 | -45.9439 | 761 |
| 01346006 | Fazenda Planalto | 45 | Correntina/BA | -13.7519 | -46.14 | 947 |
| 01346007 | Fazenda Prainha | 21 | São Desidério/BA | -13.3125 | -46.0631 | 824 |
| 01347000 | Cavalcante | 21 | Cavalcante/GO | -13.7969 | -47.4617 | 821 |
| 01445000 | Cajueiro | 45 | Januária/MG | -14.8361 | -45.1733 | 700 |
| 01447000 | Alto Paraíso de Goiás | 20 | Alto Paraíso de Goiás/GO | -14.1347 | -47.5117 | 1197 |
| 01447002 | São João d'Aliança | 20 | São João d'Aliança/GO | -14.7072 | -47.5236 | 1009 |
| 01546005 | Cabeceiras | 43 | Cabeceiras/GO | -15.8008 | -46.9247 | 900 |

Fonte: Adaptado de ANA, 2005.

4.2 Evapotranspiração

Denomina-se evapotranspiração à quantificação de dois processos simultâneos: a evaporação da água em corpos d'água, em solos ou superfícies onde ocorreu sua interceptação, e a transpiração causada pela perda de água pelas folhas das plantas, através das aberturas dos estômatos. Esses processos, juntos, são responsáveis por mais da metade da saída de água de uma bacia hidrográfica, constituindo-se em uma variável importante para o balanço hídrico e a estimativa da recarga (PERUCHI, 2009).

No Brasil, vários estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de determinar a evapotranspiração e a evaporação local. As observações meteorológicas, de forma sistemática, iniciaram em 1910, com as primeiras Normais Climatológicas determinadas em 1960, mas apenas com medições em algumas capitais. A segunda publicação das Normais Climatológicas ocorreu em 1990, compreendendo o período de 1961 a 1990 (INMET, 2012). Em 2010, o INMET publicou a Normal Climatológica do Brasil, atualizando as variáveis meteorológicas de 1961-1990 para o período de 1981-2010 e agregando novos parâmetros meteorológicos (DINIZ; RAMOS; REBELLO, 2014).

Em seguida, procedeu-se à análise da variabilidade da evaporação potencial para os períodos 1961-1990 e 1981-2010 e da evapotranspiração potencial (EVT_{pot}) para o período 1981-2010. Tal espacialização foi obtida pela interpolação das informações das Normais Climatológicas de 39 estações meteorológicas situadas

sobre e ao redor do SAU, objetivando criar uma superfície estatística em *raster*, onde as estimativas foram elaboradas para todas as células para gerar um mapa contínuo (Tabela 4.2). Observa-se que a evaporação potencial aumentou no período mais recente, ou seja, nos valores mensais houve um acréscimo entre 10% a 30% da evaporação e aumento de 18% nos valores anuais. Os maiores percentuais de evaporação ocorrem nos meses de agosto e setembro, que correspondem aos meses final e inicial, respectivamente, do ano hidrológico na região. Já o período chuvoso diz respeito aos meses de menores valores de evaporação na região – dezembro a fevereiro.

Tabela 4.2 – Valores médios de evaporação e evapotranspiração potencial do SAU obtidos pela espacialização dos dados das normais climatológicas dos períodos 1961-1990 e 1981-2010.

| Período | Evaporação | | | | Evapotranspiração | |
|-----------|------------|---------------|-----------|---------------|-------------------|---------------|
| | 1961-1990 | | 1981-2010 | | 1981-2010 | |
| | Média | Desvio-Padrão | Média | Desvio-Padrão | Média | Desvio-Padrão |
| Anual | 1677 | 74,2 | 1968 | 77,7 | 1932 | 11,0 |
| Janeiro | 90 | 5,8 | 108 | 6,4 | 173 | 6,9 |
| Fevereiro | 87 | 7,2 | 104 | 10,0 | 154 | 5,5 |
| Março | 94 | 9,5 | 104 | 9,0 | 156 | 7,0 |
| Abril | 99 | 6,6 | 119 | 9,3 | 142 | 9,4 |
| Mai | 128 | 5,3 | 150 | 6,4 | 133 | 11,3 |
| Junho | 153 | 11,0 | 174 | 16,7 | 111 | 13,0 |
| Julho | 186 | 15,3 | 209 | 22,5 | 118 | 12,8 |
| Agosto | 224 | 14,5 | 252 | 28,9 | 155 | 16,0 |
| Setembro | 226 | 13,8 | 264 | 13,7 | 192 | 17,2 |
| Outubro | 172 | 12,1 | 224 | 15,1 | 221 | 12,5 |
| Novembro | 112 | 7,0 | 140 | 11,5 | 193 | 11,4 |
| Dezembro | 87 | 4,9 | 106 | 7,1 | 182 | 9,5 |

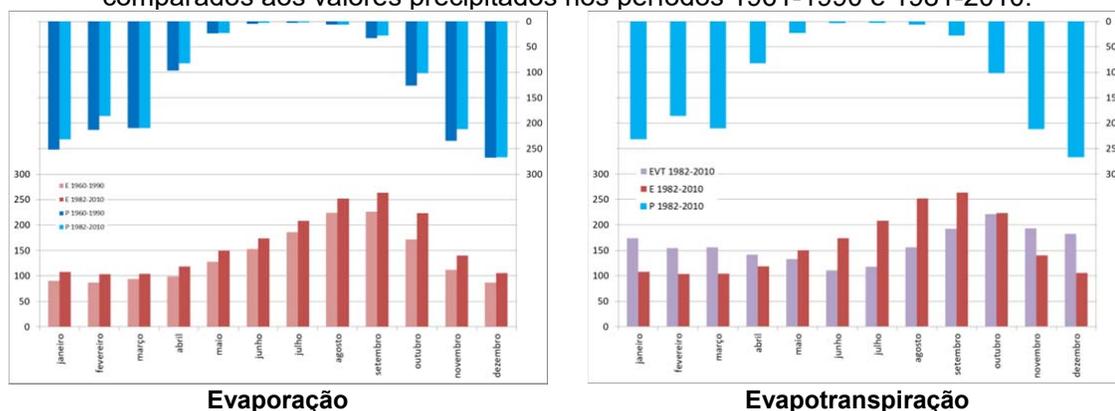
Fonte: Adaptado de INMET, 2012.

A evaporação depende da energia disponível da radiação solar para o processo de conversão da água em vapor (ela é diretamente proporcional à energia disponível). No período chuvoso, o acúmulo de nuvens na atmosfera impede que a radiação chegue à superfície, mesmo que a incidência solar seja alta. Portanto, mesmo que nos meses de dezembro a fevereiro a incidência solar seja mais alta (solstício de verão), a presença de nuvens na região impede que parte da radiação solar alcance a superfície, fazendo com que a evaporação seja baixa nesse período (Figura 4.6).

Outro fator que interfere na evaporação é a umidade relativa, que é inversamente proporcional à evaporação, ou seja, quanto mais baixa a umidade relativa, mais alta será a evaporação. Ao final do período seco, a umidade relativa chega ao seu patamar mais baixo e, ao ocorrerem as primeiras chuvas, a conversão

da água recém-precipitada ocorre em alta taxa evapométrica, aumentando a evaporação no período.

Figura 4.6 – Valores médios de evaporação e evapotranspiração potencial mensal do SAU comparados aos valores precipitados nos períodos 1961-1990 e 1981-2010.



Fonte: Adaptado de INMET, 2012.

A evapotranspiração potencial é a capacidade máxima de a água ser evaporada através da vegetação presente sobre a superfície do solo, assumindo-se a ausência de limitações na disponibilidade de água para uma dada condição climática, incluindo a evaporação do solo e a transpiração da vegetação, ou seja, a EVTpot seria igual à “chuva ideal” para que uma região não apresente excesso nem deficiência hídrica durante o ano (PEREIRA; VILA NOVA; SEDIYAMA, 1977).

O comportamento da evapotranspiração potencial ao longo do ano é diferente do comportamento da evaporação e da precipitação (vide Figura 4.6), ou seja, ela é maior no início do período chuvoso na região, atingindo seu valor máximo no mês de outubro, e tem seu declínio no final do período chuvoso, alcançando seu valor mínimo em junho.

No caso das Normais Climatológicas, essa variável foi determinada de forma indireta pelo método de Thornthwaite (DINIZ; RAMOS; REBELLO, 2014), que considera: a temperatura média diária; o índice de calor, determinado em função da temperatura média diária; e a máxima insolação diária, que depende da latitude e do mês.

Nesse contexto, a evapotranspiração é diretamente proporcional à temperatura média da região, acompanhando o mesmo comportamento da variação mensal. Isso porque temperaturas mais altas causam um aumento na perda de água da folha pelos seus estômatos (taxa de transpiração), até um limite no qual a umidade atmosférica ao redor da planta fique igual à do interior dos tecidos.

Ademais, o aumento da temperatura do ar influi favoravelmente na intensidade de evaporação do solo, o que permite que maior quantidade de vapor de água esteja presente no mesmo volume de ar acima da superfície evaporante. Assim como na EVTpot, o solo se encontra sem limitações na disponibilidade de água e a evaporação depende apenas das condições reinantes na atmosfera próximo ao solo, como energia radiante, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar.

4.3 Escoamento Superficial

O escoamento superficial consiste na parcela de água da chuva que atinge o solo e que escoar pela superfície; ou seja, aquela que não ficou retida em depressões do terreno nem infiltrou no solo.

Já os escoamentos subsuperficial e subterrâneo, são gerados pela parcela da água precipitada que infiltrou no solo, respeitando a intensidade da precipitação e a capacidade de infiltração no solo. O que diferencia esses dois tipos de escoamento é que o subsuperficial é gerado pela percolação das águas entre as camadas mais rasas do solo, considerando a declividade do terreno e a porosidade entre as partículas do solo, enquanto o subterrâneo se dá pelas águas provenientes dos aquíferos, que recebem a recarga causada pela percolação das águas para as camadas mais profundas, durante períodos de tempo variáveis e decorrentes de muitos fatores, como, por exemplo, o tipo de aquífero (TUCCI, 2000).

O escoamento subsuperficial depende diretamente da porosidade do solo, da declividade do terreno, do tipo e da intensidade da precipitação e de heterogeneidades no meio, sendo de difícil mensuração. Porém, em algum ponto da bacia hidrográfica, ele sofre exsudação na superfície e é incorporado ao escoamento superficial ou percola para as camadas mais profundas do solo, somando-se ao escoamento subterrâneo. Assim, na análise de grandes áreas de drenagem, esse escoamento não é mensurado (PAIVA; PAIVA, 2003).

Portanto, em áreas de drenagem com dimensões consideradas médias e grandes (centenas de hectares), é importante determinar os escoamentos superficial e subterrâneo, que, juntos, formam o escoamento total, que pode ser determinado para qualquer ponto final de uma área de drenagem denominado exutório.

O escoamento total, quando é calculado para um ponto ao longo de um

trecho de rio, é denominado vazão do rio naquele ponto e pode ser determinado por métodos diretos e indiretos (convencionais e não convencionais), que variam desde um simples objeto lançado na água para estimar a velocidade que percorre em certa distância, até métodos mais precisos, como molinetes, *doppler* acústicos (Automatic Doppler Current Profiler – ADCP) e, em casos mais audaciosos, por satélites (CARVALHO, 2018). A medição da vazão de forma contínua e diária, embora possível com equipamento automático registrador, é inviável de se adotar de forma generalizada para muitos pontos em uma bacia hidrográfica. Por isso, utiliza-se a medição do nível da água diário correlacionada com a vazão, por meio do método da curva-chave, para se determinar a vazão diária de um ponto ou exutório da área de contribuição. Os níveis de água dos rios são medidos com os seguintes equipamentos:

- Limnímetros (fluviômetros): destinam-se à observação direta do nível de água. O tipo mais comum é constituído de uma escala (limnimétrica) graduada em centímetros, em geral de ferro esmaltado, colocado verticalmente no leito do rio, em posição que possibilite fácil leitura.
- Limnígrafos (fluviógrafos): aparelhos que registram continuamente as variações do nível de água. Existem dois sistemas fundamentais de instrumento: os baseados no registro do movimento de um flutuador e aqueles baseados no registro da variação de pressão da água.

Existem, ainda, outros sistemas para observação dos níveis, como aqueles com flutuadores ligados a cabos graduados desenrolados do alto de uma ponte, por exemplo, ou ainda com contato elétrico.

A partir das séries históricas de dados de vazão de determinado ponto, chamado de estação fluviométrica, é possível estabelecer um gráfico da vazão em função do tempo, denominado hidrograma, que pode ser correlacionado a processos climáticos e físicos e a seus efeitos na vazão.

Nas 27 sub-bacias pertencentes à Região Hidrográfica do São Francisco, estão inseridas 68 estações fluviométricas com dados de vazão, distribuídas da seguinte forma: 29 no rio Grande (sub-bacia 46), 16 no rio Corrente (sub-bacia 45), 12 no rio Urucuia (sub-bacia 43), 10 no rio Carinhanha (sub-bacia 45), 3 no rio Pandeiros (sub-bacia 44) e 1 no rio Japoré (sub-bacia 44).

Com relação à Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia, existem três sub-bacias, nas quais estão inseridas 22 estações fluviométricas, distribuídas da

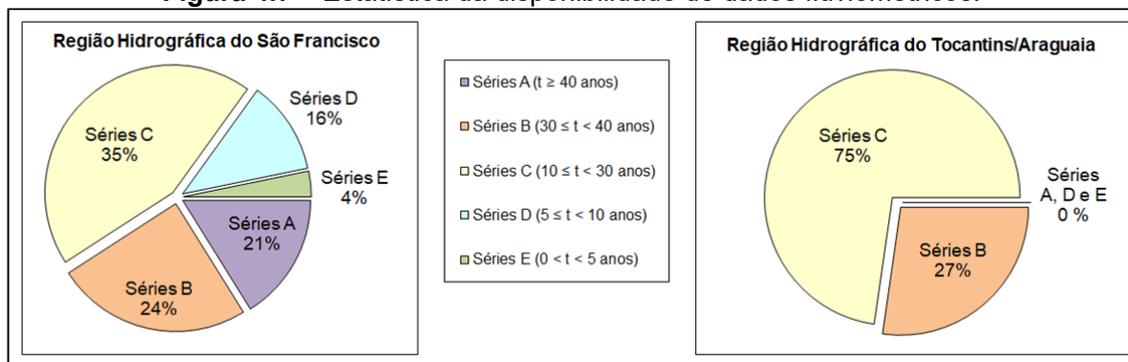
seguinte forma: 13 no rio Paranã (sub-bacia 21), 3 no rio Manuel Alves (sub-bacia 22) e 6 no rio do Sono (sub-bacia 22).

Com a menor parte da área do SAU inserida, a Região Hidrográfica do Parnaíba é a única que não apresenta condições de ser analisada por essa metodologia, pois não tem estações fluviométricas com dados de vazão disponíveis e/ou séries longas suficientes para serem utilizadas na análise dos rios afluentes que recebem descarga do SAU, incluindo os rios Gurgueia, Paraim e Paranaíba, todos inseridos na sub-bacia 34.

As 93 estações retrocitadas foram classificadas de acordo com o tamanho da série de dados disponíveis em: **A** para séries de dados com 40 anos ou mais; **B** para séries de dados com 30 até 39 anos; **C** para séries de dados com 10 até 29 anos; **D** para séries de dados com 5 até 9 anos. Séries de dados com menos de cinco anos não foram pré-selecionadas para o estudo, por serem curtas para caracterizar um comportamento hidrológico de longo tempo.

A seguir, apresentam-se as estatísticas da disponibilidade de dados fluviométricos das estações pré-selecionadas, em que 15 estações foram enquadradas na classe **A**, 23 na classe **B**, 41 como **C**, 11 na classe **D** e três foram classificadas como **E**. As estações da classe **E** não foram selecionadas e as classificadas como **D** foram separadas para serem utilizadas nas etapas de validação das simulações, por terem séries de dados curtas. Já as séries com mais de 10 anos de dados foram pré-selecionadas para serem aplicadas nas análises de caracterização da bacia (Figura 4.7; Tabela 4.3).

Figura 4.7 – Estatística da disponibilidade de dados fluviométricos.



Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Tabela 4.3 – Informações das estações pré-selecionadas por afluente das regiões hidrográficas.

| Região Hidrográfica | Afluente (Rio) | Quantidade de Estações Excluídas (Nota E) | Quantidade de Estações Não Selecionadas (Nota D) | Quantidade de Estações Pré-Selecionadas (Notas A, B, C) |
|---------------------|----------------|---|--|---|
| São Francisco | Grande | 2 | 8 | 19 |
| | Corrente | - | 1 | 15 |
| | Carinhanha | - | 1 | 9 |
| | Japoré | - | - | 1 |
| | Urucuia | 1 | 1 | 10 |
| | Pandeiros | 0 | 0 | 3 |
| Tocantins/Araguaia | Manuel Alves | 0 | 0 | 3 |
| | Paraná | 0 | 0 | 13 |
| | do Sono | 0 | 0 | 6 |

Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Após a primeira pré-seleção, construíram-se diagramas unifilares (Apêndice A), com a localização das estações fluviométricas pré-selecionadas, que servem para esquematizar a disposição fluvial por sub-bacia, sinalizando os pontos de monitoramento de cota e vazão dos cursos de água, assim como as intervenções que alterem a quantidade ou a qualidade das águas. Nesses diagramas, é utilizada, para a bacia de contribuição, a codificação definida pelo extinto Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE), ainda usada na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

Os diagramas unifilares e a viagem de campo realizada em dezembro de 2017, para reconhecimento dos pontos de amostragem nesta pesquisa (Apêndice B) e para melhor compreensão das características da área, embasaram a análise prévia de viabilidade, que resultou na segunda pré-seleção de 53 estações, pertencentes às bacias hidrográficas ou áreas de drenagem dos rios: Grande (sub-bacia 46), Corrente (sub-bacia 45), Urucuia (sub-bacia 43), Carinhanha (sub-bacia 45), Pandeiros (sub-bacia 44), Japoré (sub-bacia 44), Paraná (sub-bacia 21), Manuel Alves (sub-bacia 22) e do Sono (sub-bacia 22).

Após análise dos dados de chuva, considerando a viabilidade do cálculo do balanço hídrico, no período de setembro de 1973 a agosto de 2006, e da localização da estação (sobre o SAU ou em seu exutório), definiu-se que 33 estações fluviométricas seriam usadas para caracterizar a bacia nesse intervalo de tempo (Tabela 4.4; Figura 4.8).

Os dados mais recentes (setembro/2006-agosto/2018) dessas estações foram também analisados e utilizados na validação e comparação com os dados de

precipitação, níveis dos poços e uso do solo, cuja análise será apresentada mais à frente.

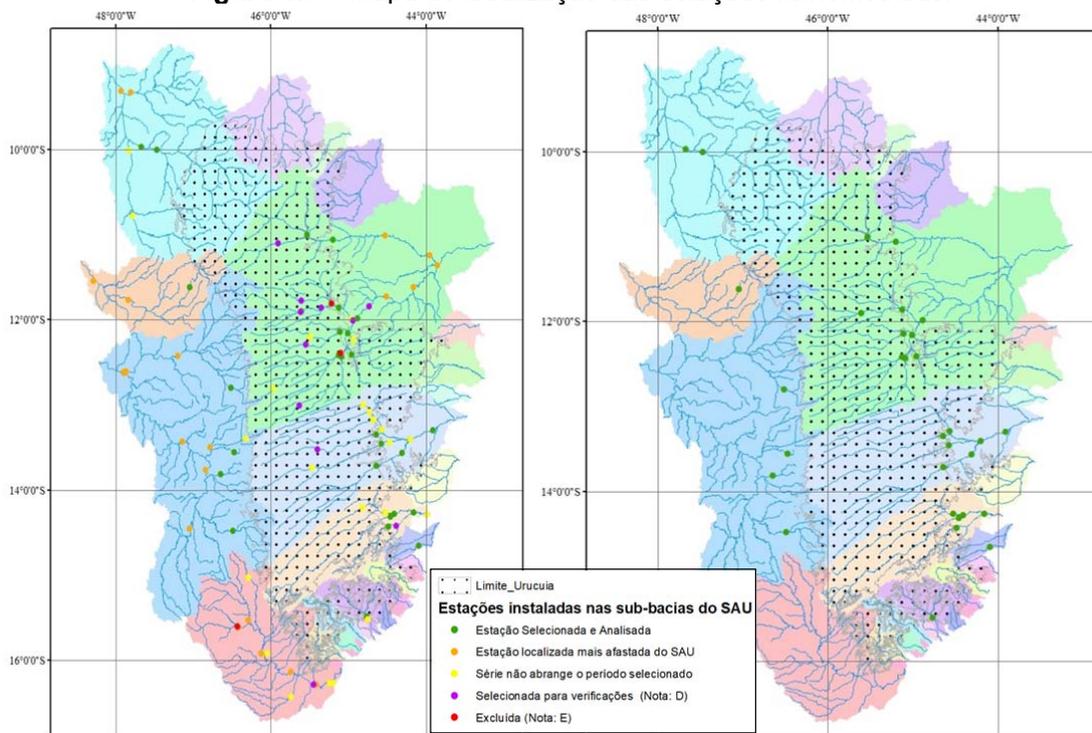
Tabela 4.4 – Vazão média de longo termo, vazão mínima e máxima, vazão específica e deflúvio médio mensal das estações selecionadas.

| SB (Rio) | Estação | Nome | Área (km ²) | Vazão Média Longo Termo (m ³ /s) | Vazão Máxima (m ³ /s) | Vazão Mínima (m ³ /s) | Vazão Específica (m ³ /s/km ²) | Deflúvio (mm/mês) |
|--------------|-----------|-----------------------------|-------------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|---|-------------------|
| Paraná | 21300000 | Alvorada do Norte | 3.760 | 55,6 | 901 | 14,5 | 14,8 | 1,28 |
| | 21510000 | Ponte São Mateus | 1.020 | 15,3 | 219 | 3,30 | 15,0 | 1,30 |
| | 21580000 | São Vicente | 409 | 10,8 | 137 | 5,20 | 26,4 | 2,28 |
| | 21750000 | Lavandeira | 1.040 | 37,0 | 477 | 19,6 | 35,6 | 3,07 |
| Manoel Alves | 22190000 | Porto Alegre | 1.780 | 42,5 | 245 | 14,3 | 23,9 | 2,06 |
| Sono | 22680000 | Jatobá (Fazenda Boa Nova) | 16.900 | 303 | 2.943 | 114 | 17,9 | 1,55 |
| | 22700000 | Novo Acordo | 18.000 | 322 | 3.154 | 125 | 17,9 | 1,55 |
| Urucuia | 43980002 | Barra do Escudo | 24.600 | 241 | 1.917 | 9,70 | 9,8 | 0,847 |
| Pandeiros | 44250000 | Usina do Pandeiros Montante | 3.230 | 23,4 | 147 | 8,10 | 7,2 | 0,626 |
| Japoré | 44540000 | Fazenda Bom Retiro | 624 | 2,00 | 39,2 | 0,400 | 3,2 | 0,277 |
| Carinhanha | 45131000 | São Gonçalo | 6.020 | 68,0 | 235 | 34,2 | 11,3 | 0,976 |
| | 45170001 | Fazenda Porto Alegre | 5.850 | 61,8 | 205 | 38,9 | 10,6 | 0,913 |
| | 45210000 | Lagoa das Pedras | 12.600 | 132 | 426 | 71,1 | 10,5 | 0,903 |
| | 45220000 | Capitânea | 2.380 | 12,4 | 76,7 | 2,90 | 5,2 | 0,450 |
| | 45260000 | Juvenília | 16.300 | 145 | 699 | 73,2 | 8,9 | 0,769 |
| Corrente | 45590000 | Correntina | 3.900 | 32,6 | 110 | 21,1 | 8,4 | 0,722 |
| | 45740001 | Mocambo | 7.950 | 41,7 | 201 | 20,4 | 5,2 | 0,453 |
| | 45770000 | Arrojado | 5.540 | 58,8 | 219 | 38,5 | 10,6 | 0,917 |
| | 45840000 | Gatos | 7.130 | 80,7 | 238 | 50,1 | 11,3 | 0,978 |
| | 45880000 | Colônia do Formoso | 9.550 | 83,2 | 312 | 51,3 | 8,71 | 0,753 |
| | 45910001 | Santa Maria da Vitória | 29.600 | 212 | 824 | 123 | 7,17 | 0,619 |
| | 45960001 | Porto Novo | 31.000 | 217 | 816 | 126 | 6,98 | 0,603 |
| Grande | 46415000 | Sítio Grande | 4.950 | 33,0 | 104 | 4,90 | 6,67 | 0,576 |
| | 46455000 | Derocal | 6.350 | 50,4 | 173 | 25,9 | 7,94 | 0,686 |
| | 46490000 | Fazenda Coqueiro | 4.470 | 6,6 | 68,8 | 1,10 | 1,48 | 0,128 |
| | 46543000 | Fazenda Redenção | 5.380 | 50,2 | 139 | 21,8 | 9,33 | 0,806 |
| | 46550000 | Barreiras | 24.400 | 89,0 | 335 | 24,6 | 3,65 | 0,315 |
| | 46570000 | Ponte Serafim Montante | 2.710 | 14,4 | 54,0 | 3,90 | 5,31 | 0,459 |
| | 46590000 | Nova Vida Montante | 7.480 | 51,6 | 169 | 31,4 | 6,90 | 0,596 |
| | 46610000 | São Sebastião | 39.100 | 191 | 652 | 107 | 4,89 | 0,423 |
| | 46770000 | Fazenda Bom Jardim* | 6.930 | 35,1 | 66,6 | 23,2 | 5,06 | 0,438 |
| | 46790000 | Formosa do Rio Preto* | 14.300 | 101 | 308 | 65,2 | 7,08 | 0,612 |
| 46902000 | Boqueirão | 65.900 | 265 | 477 | 184 | 4,02 | 0,347 | |

Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Nota: As estações com asterisco (*) estão localizadas na sub-bacia do rio Preto, afluente do rio Grande.

Figura 4.8 – Mapa de localização das estações fluviométricas.



Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

As estações analisadas na sub-bacia do rio Paranã correspondem a pequenas áreas de drenagem (entre 409 a 3.760 km²), localizadas no lado oeste do Chapadão do SAU, onde a altitudes médias variam de 813 a 970 m. Entretanto, a vazão específica é uma das mais altas da região, pois os valores de vazão específica nessa sub-bacia variaram de 14,8 l/s/km², ao sul, para 35,6 l/s/km², ao norte, sendo a média nessa sub-bacia igual a 22,9 l/s/km².

A vazão específica na sub-bacia do rio Manoel Alves é igual a 23,9 l/s/km², observada na Estação Porto Alegre (código: 22190000), a qual é equivalente à média observada na sub-bacia do rio Paranã. Na área de drenagem dessa estação (1.780 km²), a altitude sobre o SAU varia entre 484 e 912 m, sendo de 630 m a altitude média.

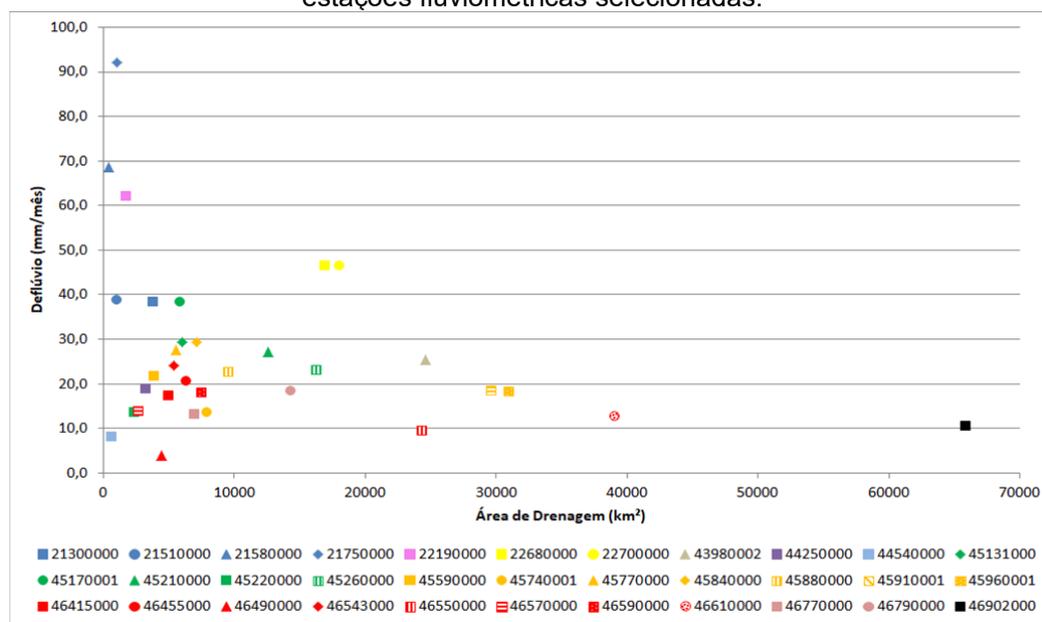
Em relação à sub-bacia do rio do Sono, as estações Jatobá (Fazenda Boa Nova, código: 22680000) e Novo Acordo (código: 22700000), que se localizam mais a jusante, mostraram coerência e continuidade nas vazões médias encontradas: 302,6 e 322,1 m³/s, respectivamente (Tabela 4.5); além disso, as áreas são equivalentes (16.900 e 18.000 km²).

Como essas estações têm a mesma área de nascente, a altitude sobre o SAU

varia entre 238 e 886 m, sendo a altitude média igual a 535 m, pois essa sub-bacia compõe a área mais baixa do SAU. As vazões específicas também foram iguais – 17,9 mm/dia –, que foram os quatro maiores valores encontrados.

Apresenta-se, a seguir, a relação entre as áreas de drenagem e os deflúvios mensais médios das estações fluviométricas selecionadas, o que corrobora com o observado na análise das vazões específicas, pois os deflúvios na Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia foram maiores do que na Região Hidrográfica do São Francisco. Conclui-se, assim, que as estações instaladas nos afluentes do rio Tocantins apresentaram as maiores vazões específicas no período analisado (Figura 4.9).

Figura 4.9 – Relação entre as áreas de drenagem e os deflúvios mensais médios das estações fluviométricas selecionadas.



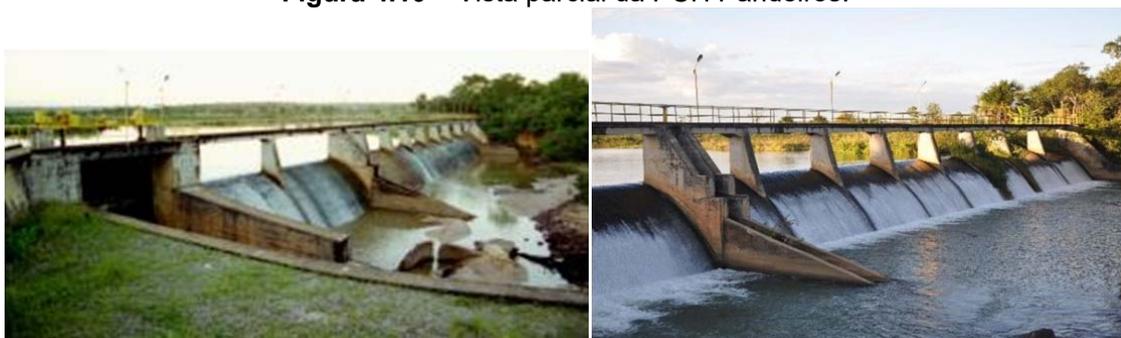
Fonte: Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Com relação à análise das estações instaladas nos afluentes do São Francisco, a primeira sub-bacia efluente do SAU é a do rio Urucuia. Como não há estação instalada nos contribuintes sobre o SAU, definiu-se que a avaliação partiria dos dados da estação localizada mais próxima à confluência com o rio São Francisco, que é a Estação Barra do Escudo (código: 43980002). Nessa estação, observa-se uma vazão média de longo termo de 214 m³/s, para uma vazão específica de 9,8 l/s/km², sendo a vazão máxima observada de 1.917,40 m³/s e a mínima, de 9,7 m³/s.

A Estação Usina do Pandeiros Montante (código: 44250000) recebeu esse

nome por estar instalada a montante da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Pandeiros, instalada em 1958, no município de Januária (MG) (Figura 4.10). A referida estação corresponde a uma pequena área de drenagem (3.230 km^2), localizada 72% sobre o SAU, no lado sul, dentro do estado de Minas Gerais, onde a altitude varia de 521 a 853 m, com média de 675 m. A vazão específica corresponde a $7,2 \text{ l/s/km}^2$, que é três vezes menor que a média das estações dos afluentes do rio Tocantins ($21,6 \text{ l/s/km}^2$). A jusante dessa estação e da PCH está localizada a Cachoeira Grande, ou do rio Pandeiros ($44^\circ 45' 12.81'' \text{W}$, $15^\circ 30' 44.49'' \text{S}$), onde existia uma estação instalada (Cachoeira Grande Montante; código: 44260000), que operou de 1946 a 1958, anteriormente à operação da usina.

Figura 4.10 – Vista parcial da PCH Pandeiros.



Fotografia: Disponível em: <www.cemig.com.br/>.

Nota: Comprimento da barragem: 180 m; altura máxima da barragem: 9 m; volume do reservatório: $0,338 \text{ hm}^3$; unidades geradoras: 3; potência instalada: 4,2 MW.

Com a segunda menor área de drenagem analisada, a Estação Fazenda Bom Retiro (código: 44540000), instalada no rio Japoré, tem uma das menores vazões específicas – $3,2 \text{ l/s/km}^2$ –, com vazão média de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, cuja vazão corre diretamente para o rio São Francisco. Apenas 28% dessa área de drenagem estão sobre o SAU, onde a altitude varia entre 625 e 828 m, com média de 708 m. O limite do SAU nessa sub-bacia localiza-se a 36,5 km a montante da Estação Fazenda Bom Retiro, onde se situa a Cachoeira de Miravânia ($44^\circ 24' 7,3'' \text{W}$, $14^\circ 46' 56,61'' \text{S}$). Nessa sub-bacia, tem-se, ainda, o rio Calindó, afluente do rio Japoré. A confluência desses dois rios está a jusante da estação analisada, motivo pelo qual a contribuição desse afluente não foi contabilizada nesta análise.

A sub-bacia do rio Carinhanha foi bastante estudada pelo meio acadêmico, devido à sua importância econômica e à sua localização – situa-se na divisa dos estados de Minas Gerais e Bahia, contemplando, parcialmente, quatro municípios

baianos e sete mineiros. Nessa sub-bacia, há cinco estações instaladas: uma no rio Itaguari (Fazenda Porto Alegre; código: 45170001), uma no rio Coxá (Capitânea; código: 45220000) e três no rio Carinhanha (São Gonçalo; código: 45131000; Lagoa das Pedras; código: 45210000; Juvenília; código: 45260000). Todas estão instaladas a jusante do SAU, sendo que Lagoa das Pedras está à jusante de São Gonçalo e Fazenda Porto Alegre, e Juvenília está à jusante de Lagoa das Pedras e Capitânea. Nessa sub-bacia, que tem 69% de sua área sobre o SAU, todas as estações apresentaram coerência e continuidade nas áreas e vazões médias encontradas (Tabela 4.5). A altitude sobre o SAU varia entre 518 e 949 m, com média igual a 739 m. A vazão específica nas áreas de drenagem variou entre 11,3 e 8,9 l/s/km², à exceção da área de drenagem da Estação Capitânea, que se situa mais ao sul, no limite de transição, e apresentou vazão de 5,2 l/s/km².

Tabela 4.5 – Análise de continuidade e coerência entre os dados das estações a montante das estações analisadas.

| Estação de Referência | | | Estações a Montante da Referência | | |
|-----------------------|-------------------------|---------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Código | Área (km ²) | Vazão (m ³ /s) | Códigos | Soma das Áreas (km ²) | Soma das Vazões (m ³ /s) |
| 22700000 | 18.000 | 322,1 | 22680000 | 16.900 | 302,6 |
| 45210000 | 12.600 | 131,7 | 45131000 + 45170001 | 11.870 | 129,8 |
| 45260000 | 16.300 | 145,1 | 45210000 + 45220000 | 14.980 | 144,1 |
| 45880000 | 9.550 | 83,2 | 45840000 | 7.130 | 80,7 |
| 45910001 | 29.600 | 212,1 | 45590000 + 45740001 + 45770000 + 45880000 | 26.940 | 216,3* |
| 45960001 | 31.000 | 216,5 | 45910001 | 29.600 | 212,1 |
| 46550000 | 24.400 | 89,0 | 46415000 + 46455000 + 46490000 | 15.770 | 90,0* |
| 46590000 | 7.480 | 51,6 | 46570000 | 2.710 | 14,4 |
| 46610000 | 39.100 | 191,3 | 46543000 + 46550000 + 46590000 | 37.260 | 190,8 |
| 46790000 | 14.300 | 101,3 | 46770000 | 6.930 | 35,1 |
| 46902000 | 65.900 | 265,0 | 46610000 + 46790000 | 53.400 | 35,1 |

Fonte: Elaborada por Myrta S.B. Vieira, 2020.

Nota: Os valores marcados com asterisco (*) indicam necessidade de melhor avaliação dos respectivos trechos.

Outra sub-bacia muito estudada na região é a do rio Corrente, onde se analisaram sete estações, das quais quatro estão localizadas mais a montante: Correntina (código: 45590000), no rio Correntina; Mocambo (código: 45740001), no rio do Meio; Arrojado (código: 45770000), no rio Arrojado; Gatos (código: 45840000), no rio Formoso. A Estação Colônia do Formoso (código: 45880000) está localizada a jusante da Estação Gatos e a Estação Santa Maria da Vitória (código: 45910001)

está situada a jusante de todas as estações citadas anteriormente.

Na Estação Santa Maria da Vitória (código: 45910001), deveria passar uma vazão superior a $216,3 \text{ m}^3/\text{s}$, que é a soma das vazões a montante; todavia, a vazão média de longo termo dessa estação é de $212,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Por isso, é importante investigar se há captação maior do que $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ nesse trecho do rio Corrente que justifique essa diferença.

A jusante de Santa Maria da Vitória está instalada a Estação Porto Novo (código: 45960001), que foi analisada com o intuito de se avaliar a continuidade das vazões nessa sub-bacia, que tem 78% de sua área sobre o SAU, onde a altitude varia entre 536 a 1.019 m, cuja média é igual a 785 m.

Na bacia do rio Corrente, as vazões específicas nas áreas de drenagem variaram entre 5,2 e $11,3 \text{ l/s/km}^2$, valores iguais aos observados na sub-bacia do rio Carinhanha. As maiores vazões específicas foram observadas nas estações de Arrojado ($10,6 \text{ l/s/km}^2$) e Gatos ($11,3 \text{ l/s/km}^2$), cujas nascentes localizam-se na mesma linha das nascentes dos rios Itaguari e Carinhanha, que apresentaram valores parecidos.

A última sub-bacia estudada – a do rio Grande – é a maior bacia hidrográfica abastecida pelo SAU e a que apresentou os menores valores de vazão específica, tendo sido encontrados valores de 1,5 a $9,3 \text{ l/s/km}^2$, com valor médio de $5,7 \text{ l/s/km}^2$.

Nessa sub-bacia, foram selecionadas e avaliadas as séries de 11 estações fluviométricas, porém há apenas quatro estações instaladas: Sítio Grande (código: 46415000), instalada mais a montante, tem 96% de sua área sobre o SAU, com altitudes entre 650 até 1.035 m, com média igual a 779 m; Barreiras (código: 46550000), instalada após a confluência com os rios das Fêmeas e São Desidério, mas antes da confluência com o rio de Ondas; São Sebastião (código: 46610000), instalada após a confluência com os rios de Ondas e Branco; Boqueirão (código: 46902000), instalada após a confluência com o rio Preto.

Em seu maior afluente, o rio Preto, há duas estações instaladas: Fazenda Bom Jardim (código: 46770000), mais a montante, e Formosa do Rio Preto (código: 46790000), mais a jusante; porém, a área sobre o SAU não são as mesmas (6.915 km^2 e 13.768 km^2 , respectivamente). Em média, as altitudes nessa parte do SAU são iguais, em torno de 740 m, com variação entre 489 a 908 m.

Com relação às outras estações avaliadas na sub-bacia do rio Grande, três estão instaladas em afluentes diretos do rio Grande: rio das Fêmeas (Derocal –

código: 46455000); rio São Desidério (Fazenda Coqueiro – código: 46490000) e rio de Ondas (Fazenda Redenção – código: 46543000), com 98%, 96% e 99%, respectivamente, de suas áreas de drenagem dentro do SAU. Duas estações estão instaladas no rio de Janeiro (Ponte Serafim Montante – código: 46570000), afluente do rio Branco, onde está instalada a Estação Nova Vida (código: 46590000); ambas têm mais de 95% de suas áreas de drenagem sobre o SAU.

Na Estação de Barreiras (código: 46550000), observa-se uma vazão média de longo termo menor que a vazão observada a montante, que é igual a $89,9 \text{ m}^3/\text{s}$, fato semelhante ao que ocorreu na Estação de Santa Maria da Vitória (código: 45910001), no rio Corrente, mostrando que esse trecho também precisa ser mais bem avaliado.

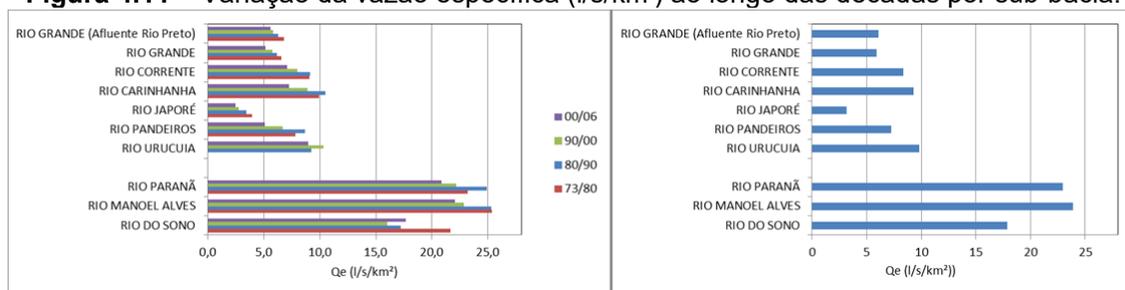
Para entender se a vazão específica das estações sofreu alteração ao longo do período analisado (setembro/1973-agosto/2006 – 33 anos), definiu-se a vazão específica para cada estação e a média por sub-bacia, o que nos mostrou que a vazão específica está diminuindo em toda a região. Entretanto, a vazão específica, após o ano 2000, diminuiu em média 14% nas sub-bacias do rio Tocantins; já nas sub-bacias do rio São Francisco a diminuição foi de 27% em média, chegando a 37% em algumas áreas.

Costa et al. (2019) e Mantovani et al. (2019) registraram valores entre 0,4 e $12,4 \text{ l/s/km}^2$ para a vazão específica da vazão média de longo termo para a sub-bacia do rio Grande, e entre 1,7 e $14,3 \text{ l/s/km}^2$ para as sub-bacias dos rios Carinhanha e Corrente. Na presente pesquisa, para a Região Hidrográfica do São Francisco, encontraram-se valores dentro da faixa indicada pelos autores citados, de 1,5 e $9,3 \text{ l/s/km}^2$ para a sub-bacia do rio Grande, e entre 5,2 e $11,3 \text{ l/s/km}^2$ para as sub-bacias dos rios Carinhanha e Corrente.

Entretanto, Costa, Botta e Cardille (2003) encontraram um valor inferior para a Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia, indicando uma vazão específica de $14,4 \text{ l/s/km}^2$ ($1,24 \text{ mm/dia}$) para o período de 1979 a 1998, enquanto neste trabalho a vazão específica variou entre 14,8 e $35,5 \text{ l/s/km}^2$.

De modo geral, as estações instaladas nos afluentes do rio São Francisco apresentaram vazões específicas três vezes menores que as observadas nos rios da Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia no período analisado, sendo que os valores mais baixos estão dentro da Região Hidrográfica do São Francisco, nas áreas mais ao norte do SAU (Figura 4.11).

Figura 4.11 – Variação da vazão específica ($l/s/km^2$) ao longo das décadas por sub-bacia.



Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

4.4 Escoamento Subterrâneo ou Vazão de Base

Durante a ausência de precipitação, como não há escoamento superficial nos períodos de secas e estiagens, a vazão nos rios é mantida pelo escoamento subterrâneo, visto que a liberação natural das águas armazenadas nas redes de canais a montante do trecho considerado, bem como a evaporação das águas armazenadas em aquíferos, são componentes que podem ser desprezadas nessas situações hidrológicamente críticas (REIS JUNIOR, 2012).

De acordo com Hewlett e Nutter (1969 apud GUERRA; CUNHA, 2001), o escoamento subterrâneo, também conhecido como vazão de base, consiste em uma componente da vazão de um rio qualquer, que se mantém durante os períodos secos e é alimentado pela descarga da água subterrânea. Ou seja, é o escoamento gerado pelas águas subterrâneas existentes nos aquíferos, cuja recarga vem através da parcela de água infiltrada e que percola até as camadas mais profundas do solo. Ressalta-se que os aquíferos são formações geológicas com conexão hidráulica com o corpo hídrico superficial, permitindo que a água residente seja descarregada na rede de drenagem. Entretanto, essa descarga depende do tipo, da geometria e das características hidráulicas do aquífero, além da quantidade de água armazenada e de suas propriedades de transmissão de água (PAIVA; PAIVA, 2003).

A vazão de base também pode ser definida como a descarga gerada após o instante final da chuva, somada ao intervalo temporal correspondente ao tempo de concentração da bacia, cuja forma no hidrograma é definida por uma curva exponencial decrescente, comumente determinada por métodos gráficos, baseados na análise dos hidrogramas, que têm base física e contemplam as componentes das águas superficiais e subterrâneas, como os métodos de traçado de linha apresentados por Custódio e Llamas (1983 apud MIRANDA, 2012). Há, também,

métodos de análise da frequência que usam filtros, como o Filtro Digital Recursivo de Eckhardt (COLLISCHONN; FAN, 2012; DORA, 2013; ECKHARDT, 2008), como também os métodos de análise de recessão do escoamento, como os propostos por Boussinesq (1904 apud VERHOEST, 2000), Horton (1945 apud TROCH et al., 2013), Meyboom (1961 apud ARNOLD et al., 1995) e Rorabaugh (1964 apud ARNOLD; ALLEN, 1999). Em estimativas mais complexas, utilizam-se isótopos ou análises químicas, para identificar tendências de fluxos das águas provenientes dos aquíferos.

Neste trabalho, usa-se a metodologia do filtro digital recursivo desenvolvido por Lyne e Hollick (1979), com base em análise e processamento de sinais (LYNN, 1973), utilizado por diversos autores, tais como Arnold et al. (1995), Arnold e Allen (1999) e Szilagyi (2003, 2004). Entretanto, a maior aplicação dessa metodologia é no âmbito do SWAT (ARNOLD et al., 2012).

O método do filtro digital recursivo consiste em aplicar procedimentos matemáticos a dados digitais. No caso desta pesquisa, aplicou-se a média móvel recursiva – $N = 2$ – aos dados de escoamento superficial, ou seja, ao escoamento rápido que é gerado pela parte da precipitação que não infiltra no solo nem evapora. Entretanto, Lyne e Hollick (1979) consideraram que se propagava no tempo uma porcentagem da vazão superficial, que seria igual ao parâmetro β . Em seguida, escreveram a diferença da vazão superficial em função da vazão total do rio, considerando essa mesma porcentagem propagada para a vazão total. Com isso, a equação do filtro recursivo digital resultou em:

$$q_t = \beta \cdot q_{t-1} + \frac{(1+\beta)}{2} \cdot (Q_t - Q_{t-1}) \quad (I)$$

Onde: q_t é a vazão superficial no instante t ; q_{t-1} é a vazão superficial no instante anterior ($t - 1$); Q_t é a vazão total do rio no instante t ; Q_{t-1} é a vazão total do rio no instante anterior ($t - 1$) e β é a constante do filtro, com valor compreendido entre 0.75 e 0.9 (LYNE; HOLLICK, 1979).

Assim, se desconsideramos o escoamento subsuperficial, a vazão total do rio é igual à soma da vazão superficial com a vazão de base. Portanto, no instante t , a vazão de base pode ser calculada pela equação:

$$Qb_t = Q_t - q_t \quad (II)$$

Esse filtro digital, análogo à filtragem de sinais de alta frequência, não tem verdadeira base física, mas é objetivo e reproduzível. No caso apresentado no programa BaseFlow (ARNOLD et al., 1995), usado para determinar a vazão de base proveniente do SAU, o valor de β é fixo, igual a 0,925 (NATHAN; MCMAHON, 1990), e o filtro passa três vezes pelos dados de vazão (para frente, para trás e para frente).

Portanto, a vazão de base diária (QB), em m³/s, foi definida como sendo igual à média entre as vazões de base, no mesmo instante t, mas obtidas na primeira e segunda passagem do filtro, com base no estudo de Arnold e Allen (1999), que concluíram que a porcentagem de contribuição do fluxo de base para vazão total do rio, em geral, deve se situar entre os valores encontrados na primeira e segunda passagem:

$$QB_t = \frac{Qb_{t(1^{\circ}passagem)} + Qb_{t(2^{\circ}passagem)}}{2} \quad (III)$$

Dessa forma, foi definida a vazão de base diária de cada estação analisada, localizada nos rios efluentes do Sistema Aquífero Urucuaia, para o período de setembro de 1973 a agosto de 2006, a partir das séries de vazão das 33 estações fluviométricas selecionadas e analisadas.

No caso do SAU, o filtro foi passado nas séries de dados das 33 estações fluviométricas selecionadas, apresentando-se os valores de vazão de base médios, mínimos e máximos das séries, além dos valores por período (Tabela 4.6).

Nesta análise, também se determinou que as vazões de base constituem, em média, 88,4% da vazão do rio. Entretanto, esse valor não é uniforme em todas as sub-bacias. Nas sub-bacias dos afluentes do Tocantins, 77 a 83% da vazão dos rios são provenientes do SAU, enquanto nas sub-bacias do rio São Francisco, essa dependência é maior, em torno de 90%; já nas sub-bacias mais ao sul (Pandeiros e Japoré), esse valor cai para 80%, justamente nas sub-bacias onde ocorre a maior intermitência desse sistema aquífero. Nas demais sub-bacias que ocupam a maior parte sobre o SAU, a dependência do SAU é quase integral, pois, em média, a vazão de base é responsável por 91,5% das vazões dos rios, sendo as maiores encontradas na sub-bacia do rio Corrente – em torno de 93%.

Tabela 4.6 – Valores característicos da vazão de base média, mínima e máxima por estação.

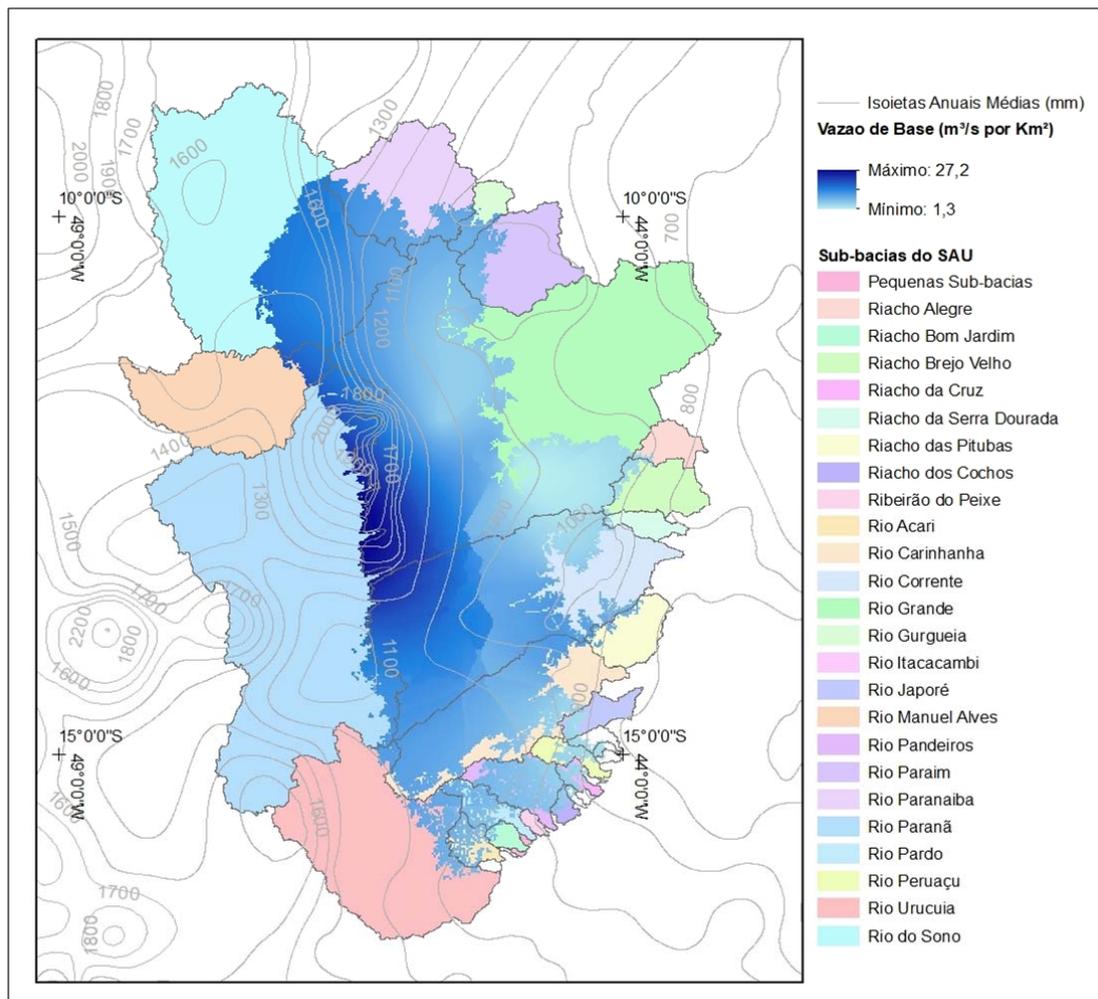
| Sub-Bacia (Rio) | Estação | Nome | Vazão de Base (m ³ /s) | | |
|-----------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|--------|--------|
| | | | Média | Mínima | Máxima |
| Paraná | 21300000 | Alvorada do Norte | 44 | 14 | 396 |
| | 21510000 | Ponte São Mateus | 12 | 3 | 109 |
| | 21580000 | São Vicente | 9 | 3 | 35 |
| | 21750000 | Lavandeira | 32 | 16 | 148 |
| Manoel Alves | 22190000 | Porto Alegre | 35 | 14 | 148 |
| do Sono | 22680000 | Jatobá (Fazenda Boa Nova) | 244 | 71 | 1.393 |
| | 22700000 | Novo Acordo | 260 | 75 | 1.940 |
| Urucuia | 43980002 | Barra do Escudo | 159 | 10 | 1.608 |
| Pandeiros | 44250000 | Usina do Pandeiros Montante | 20 | 7 | 88 |
| Japoré | 44540000 | Fazenda Bom Retiro | 2 | 0 | 21 |
| Carinhanha | 45131000 | São Gonçalo | 61 | 22 | 189 |
| | 45170001 | Fazenda Porto Alegre | 57 | 23 | 139 |
| | 45210000 | Lagoa das Pedras | 120 | 46 | 328 |
| | 45220000 | Capitânea | 11 | 3 | 47 |
| | 45260000 | Juvenília | 131 | 53 | 468 |
| Corrente | 45590000 | Correntina | 31 | 19 | 73 |
| | 45740001 | Mocambo | 38 | 20 | 120 |
| | 45770000 | Arrojado | 55 | 26 | 135 |
| | 45840000 | Gatos | 76 | 33 | 159 |
| | 45880000 | Colônia do Formoso | 78 | 32 | 207 |
| | 45910001 | Santa Maria da Vitória | 197 | 99 | 591 |
| Grande | 45960001 | Porto Novo | 200 | 97 | 626 |
| | 46415000 | Sítio Grande | 31 | 5 | 78 |
| | 46455000 | Derocal | 47 | 20 | 125 |
| | 46490000 | Fazenda Coqueiro | 6 | 1 | 39 |
| | 46543000 | Fazenda Redenção | 46 | 20 | 99 |
| | 46550000 | Barreiras | 82 | 25 | 221 |
| | 46570000 | Ponte Serafim Montante | 13 | 4 | 35 |
| | 46590000 | Nova Vida Montante | 48 | 26 | 117 |
| | 46610000 | São Sebastião | 178 | 8 | 435 |
| | 46770000 | Fazenda Bom Jardim* | 33 | 12 | 58 |
| | 46790000 | Formosa do Rio Preto* | 101 | 33 | 249 |
| 46902000 | Boqueirão | 249 | 92 | 862 | |

Fonte: Elaborada por Myrla, S.B. Vieira, 2020.

Nota: As estações com asterisco (*) estão situadas na sub-bacia do rio Preto, afluente do rio Grande.

Os valores médios da vazão de base mostraram a mesma tendência da vazão total, sendo os maiores valores das vazões de base provenientes do SAU encontrados nos afluentes do rio Tocantins (Figura 4.12).

Figura 4.12 – Mapa da espacialização da vazão de base liberada pelo SAU.



Fonte: Elaborada por Myrla, S.B. Vieira, 2020.

Para cada ano hidrológico, determinou-se a curva de recessão anual a partir dos fluxos de base diários. Devido a falhas nas séries de vazões diárias, em média se definiram 31 recessões para cada estação, que foram usadas para calcular a curva de recessão principal utilizada na determinação da constante e do tempo de recessão.

A constante de recessão consiste na inclinação da reta de decaimento da vazão do rio e sua única fonte é a água proveniente do sistema aquífero; por isso, depende principalmente da geologia, do tipo de solo e da geomorfologia da região. Ou seja, em função da recarga, a constante de recessão avalia a resposta do fluxo subterrâneo e informa se, nas vazões, a resposta à recarga é lenta (0,1 e 0,3) ou se a área analisada é sensível à recarga (0,9 e 1,0) (SALLES, 2012).

Todas as constantes de recessão da vazão de base foram no máximo iguais a 0,047, mostrando que a resposta à recarga é muito lenta nessa área; além disso, a recessão da vazão de base demora 184 dias, em média, para diminuir em cada ciclo (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Fração da vazão contribuída pela vazão de base proveniente do SAU nos três passos do filtro digital recursivo no período analisado (1973-2006).

| Estação | Fração Passo 1 | Fração Passo 2 | Fração Passo 3 | Constante de Recessão | Tempo de Recessão |
|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|-------------------|
| 21300000 | 0.83 | 0.76 | 0.72 | 0.017 | 135 |
| 21510000 | 0.82 | 0.74 | 0.69 | 0.009 | 268 |
| 21580000 | 0.87 | 0.82 | 0.79 | 0.007 | 313 |
| 21750000 | 0.88 | 0.83 | 0.81 | 0.018 | 131 |
| 22190000 | 0.84 | 0.78 | 0.74 | 0.016 | 149 |
| 22680000 | 0.84 | 0.77 | 0.73 | 0.016 | 146 |
| 22700000 | 0.84 | 0.77 | 0.73 | 0.026 | 90 |
| 43980002 | 0,75 | 0,61 | 0,53 | 0,047 | 49 |
| 44250000 | 0.87 | 0.81 | 0.77 | 0.018 | 129 |
| 44540000 | 0.81 | 0.72 | 0.67 | 0.035 | 65 |
| 45131000 | 0.91 | 0.86 | 0.83 | 0.014 | 164 |
| 45170001 | 0.94 | 0.91 | 0.89 | 0.009 | 244 |
| 45210000 | 0.93 | 0.89 | 0.86 | 0.014 | 167 |
| 45220000 | 0.9 | 0.84 | 0.8 | 0.021 | 109 |
| 45260000 | 0.93 | 0.88 | 0.86 | 0.015 | 156 |
| 45590000 | 0.95 | 0.92 | 0.91 | 0.008 | 307 |
| 45740001 | 0.93 | 0.89 | 0.86 | 0.016 | 144 |
| 45770000 | 0.95 | 0.92 | 0.9 | 0.009 | 247 |
| 45840000 | 0.96 | 0.93 | 0.91 | 0.007 | 331 |
| 45880000 | 0.95 | 0.92 | 0.9 | 0.011 | 212 |
| 45910001 | 0.94 | 0.91 | 0.89 | 0.011 | 206 |
| 45960001 | 0.94 | 0.9 | 0.88 | 0.014 | 166 |
| 46415000 | 0.95 | 0.91 | 0.88 | 0.013 | 177 |
| 46455000 | 0.95 | 0.92 | 0.9 | 0.010 | 241 |
| 46490000 | 0.89 | 0.82 | 0.77 | 0.022 | 105 |
| 46543000 | 0.93 | 0.9 | 0.87 | 0.017 | 132 |
| 46550000 | 0.94 | 0.9 | 0.87 | 0.012 | 188 |
| 46570000 | 0.9 | 0.84 | 0.8 | 0.019 | 120 |
| 46590000 | 0.94 | 0.91 | 0.89 | 0.010 | 243 |
| 46610000 | 0.95 | 0.91 | 0.89 | 0.012 | 191 |
| 46770000 | 0.95 | 0.92 | 0.9 | 0.010 | 242 |
| 46790000 | 0.93 | 0.9 | 0.87 | 0.012 | 188 |
| 46902000 | 0,96 | 0,92 | 0,9 | 0,005 | 430 |

Fonte: Elaborada por Myrla, S.B. Vieira, 2020.

As vazões de base diárias também foram definidas para cada uma das 33 estações analisadas, para o período de setembro de 2006 a agosto de 2018, de modo a serem analisadas e utilizadas na validação e comparação com os dados de: precipitação, níveis dos poços e uso do solo.

5 A RELAÇÃO ENTRE A OSCILAÇÃO MULTIDECADAL DO ATLÂNTICO E A RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA¹

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE ATLANTIC MULTIDECADAL OSCILLATION AND THE URUCUIA AQUIFER SYSTEM RECHARGE

Abstract

This study investigates and detects links between the precipitation characteristics with meteorological systems and teleconnections around the Urucuia Aquifer System (UAS). Several studies show the influence of meteorological systems and teleconnections on the volume and intensity of precipitation in South America, mainly the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), the El Niño South Oscillation (ENSO), and the Pacific Decadal Oscillations (PDO). Then, the precipitation series' statistical characterization impacted the aquifer system's recharge from 1973 to 2006. Monthly and annual series were analyzed and tested the correlation analysis with the indexes of the AMO, PDO, and ENSO. Finally, the series of maximum daily rainfall on the UAS was determined, and the 15 largest events were chosen to analyze the retroactive trajectories of air masses and thus try to estimate which atmospheric systems was acting and their origin. It concluded that the total annual precipitation data indicated a decreasing linear trend and that external climatic phenomena can influence precipitation characteristics. The correlation with the AMO index revealed a potential teleconectivity between climate circulation patterns with average annual precipitation over the UAS ($p\text{-value} \leq 0.03$). Moreover, the analysing of precipitation trajectories observed a greater amount of specific humidity in the atmosphere during the AMO negative period concerning the AMO positive period. Also, the negative AMO phase's trajectories had higher latitudes closer to the Intertropical Convergence Zone, as opposed to the positive AMO phase, where the trajectory altitudes were lower and closer to the Capricorn tropic.

Keywords: Urucuia. Teleconexões. Precipitation. Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO).

Highlights

- Potential teleconectivity between patterns of climatic circulation and precipitation.
- No significant correlation was verified between precipitation and the Pacific Decadal Oscillation (PDO) index or Southern Oscillation Index (SOI) or the Multivariate El Niño South Oscillation (ENSO) index.
- The regulatory reserve of the Urucuia Aquifer System (UAS) is constituted exclusively from the infiltration of rainwater.
- It was not possible to correlate the high daily rainfall rates with the occurrence of a predominant atmospheric system.

¹ Os dados, os resultados de testes e os resultados parciais desta pesquisa estão disponíveis no Apêndice C (CD-ROM em anexo).

5.1 Introduction

The rain observed in South America's central portion is characterized by tropical and subtropical precipitation, with a marked seasonal cycle over the continent. In winter, it experiences its dry season, and, in the summer, a low-pressure zone located approximately at latitude of 25°S forces the east winds over the Amazon basin to turn south. These winds channel the wet masses between the eastern hillslope of the Andes and the Brazilian Plateau, which feed the convective summer storms over the subtropical plains to latitudes of 35°S (Garreaud *et al.*, 2009). Thus, creating the South America Monsoon System which marks a well-defined rainy season in the summer and a season with little rainfall in winter (Liebmann and Mechoso, 2011).

Associated with this monsoon system, there are the minimum pressure belt and the intense low-level convergence of trade winds over the equatorial oceans, which cause a band of clouds with great vertical development. This system surrounds the globe close to the equator, forming storm activities, generated due to solar heating and the vertical movement of trade winds, corresponding to the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), where the active precipitation is mostly of a convective nature, produced by deep cumulus-nimbus (Garreaud *et al.*, 2009). It is important to note that the ITCZ has more zonal behavior between November and December over the southern hemisphere when it starts moving south.

The monsoon systems of South America and the Intertropical Convergence Zone, acting together, make Brazilian southeast that are close to the Tropic of Capricorn not to have characteristics of arid and dry areas, such as the Sahara, Atacama, Kalahari, and Australia. The air masses' dynamics create the meteorological system called the South Atlantic Convergence Zone (SACZ), which is a typical summer system. This system is characterized by a band of cloudiness oriented in the northwest-southeast direction, whose area of operation encompasses the center-south of the Amazon and the center-west and southeast regions of Brazil, and can also reach the center-south of Bahia, the north of Paraná and extend to the Southwest Atlantic, associated with a convergence zone of the flow of humidity in the lower troposphere (Reboita *et al.*, 2012). These systems have already been extensively studied and had their influence on rainfall occurrence (Marengo and Dias,

2006; CEPED, 2012; Reboita *et al.*, 2012; Marshall *et al.*, 2014; Gan *et al.*, 2015; Escobar *et al.*, 2016; Nielsen *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019).

However, several studies currently analyze the relationship and influences of teleconnections, which are trends in associations between the variability of atmospheric pressure and circulation patterns that occur in one location, with their effect elsewhere (Limberger, 2016).

Several studies show the existence of teleconnections between precipitation in South America, with several modes of variability, which can mention (IPCC, 2007):

- Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO): natural variability based on average anomalies of sea surface temperatures (TSM) in the North Atlantic.
- El Niño South Oscillation (ENSO): natural variability over the tropical Pacific Ocean, which originates when El Niño and the South Oscillation co-occur, with El Niño being a process of high pressure and heating of sea temperatures, and the Southern Oscillation an atmospheric component, associated with changes in sea temperature.
- Pacific Decadal Oscillation (PDO): pattern of climatic variability centered in the North Pacific Ocean, which occurs due to the variation in the temperatures of the Pacific Ocean, whose positive phase provides an increase in temperature, decrease in humidity and increase numbers of occurrences and the intensity of El Niño, and in the negative phase, a consequent decrease in temperatures, an increase in air humidity and a greater incidence and intensity of La Niña.

Studies have analyzed the relationship of the Atlantic Multidecadal Oscillation and El Niño South Oscillation and their influence on South American rainfall and found that El Niño events, concomitant with the cold AMO phase, are generally stronger than events in the hot AMO phase due to negative temperatures in the inter-Pacific-Atlantic sea surface (Kayano and Capistrano, 2014).

As an example, a study in Chile showed that the relationships between low-frequency variability of precipitation and the PDO are significant for the north of the country, while connections with the AMO are significant for the north and also for the south and that this low-frequency variability in Chile appears to be largely linked to PDO and AMO modulation (Valdés-Pineda, Cañón and Valdés, 2018).

The AMO's impact in the summer monsoon of South America was investigated in the drainage basin of the River Plate (Chiessi *et al.*, 2009). The authors concluded that the sea surface temperature and the anomalies of atmospheric circulation

triggered by AMO would control the variability of the South American Monsoon System (SAMS) (Chiessi *et al.*, 2009).

In Brazil, a study carried out in dry and rainy years in the Northeast of the country showed that the main difference in the anomaly patterns of sea surface temperature between the AMO phases is the differential positioning of the heating or cooling surface waters in the equatorial Atlantic. As a result, Hadley and Walker's anomalous circulations also show differences between the phases of the AMO, justifying the precipitation anomalies observed in tropical South America (Kayano *et al.*, 2016).

At the same time, ENSO indices combined with the Normalized Difference Vegetation Index, estimated from satellite images, were used to build a drought onset model for north-eastern Brazil, and the results showed that the combination of these indices could provide a good alternative for building a prediction model for the onset of drought in the region (Liu and Juarez, 2001).

This study started to investigate and detect links between the characteristics in precipitation, mainly volume and intensity, with meteorological systems and teleconnections, to define better water availability scenarios, including assessing the issue of aquifer recharge, which has precipitation as its natural source, since its regulatory reserve is constituted from the infiltration of rainwater.

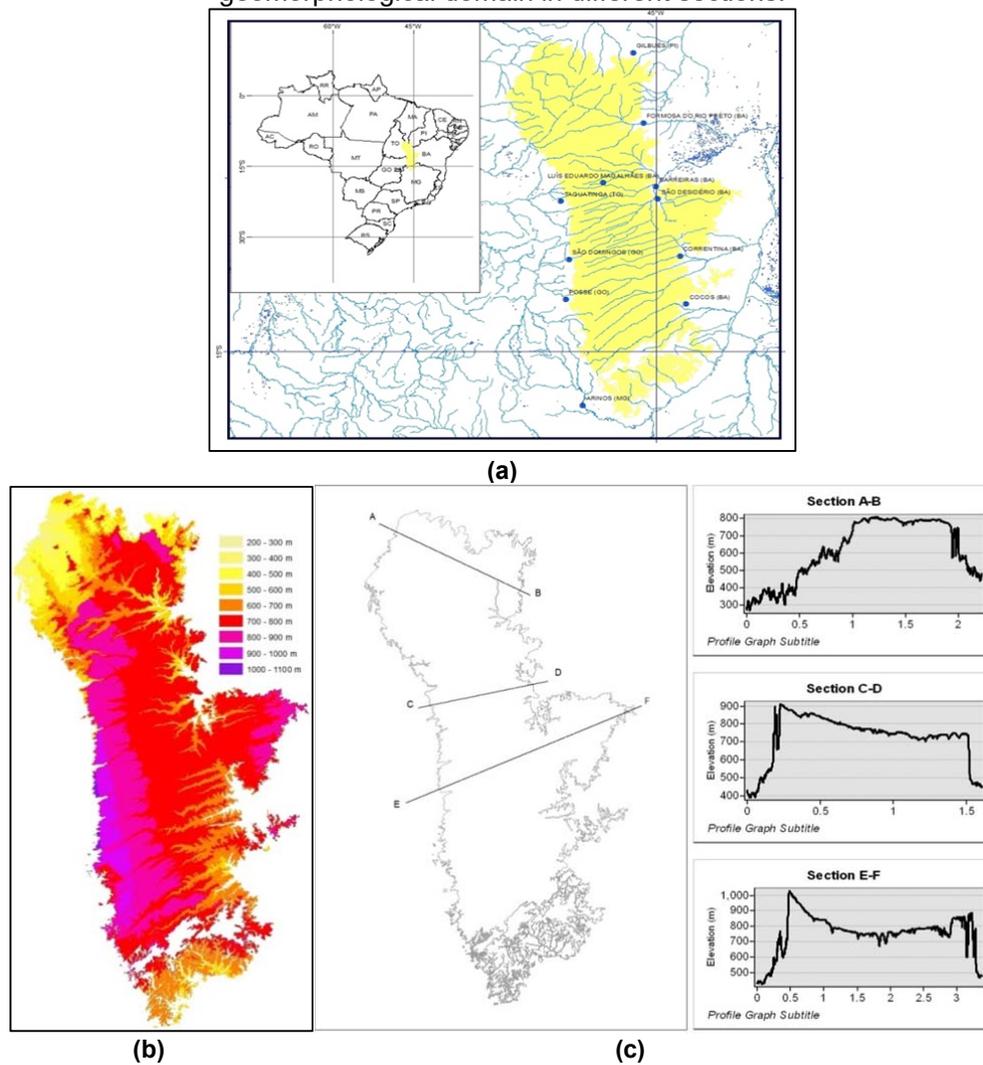
The area chosen to carry out this study is located on the Urucuia Aquifer System (UAS), a region experiencing an accelerated agro-industrial expansion that began 30 years ago, to the point that it is currently considered one of the most important centers of irrigated agriculture of the country. However, the inherent scenario of high surface and underground water demand is accompanied by changes in vegetation cover, notably the suppression of extensive areas of Cerrado forest, and a high risk of contamination by fertilizers and pesticides, in addition to the inevitable urban expansion of certain outbreaks. Therefore, it is essential to know the region's water availability, considering the part of precipitation that will contribute to its recharge, influencing the regulatory reserve. If the meteorological systems and teleconnections influence the volume and intensity of precipitation, they must be considered in the management of water availability in the region of the Urucuia Aquifer System.

5.2 The Urucuia Aquifer System

The Urucuia Aquifer System is a groundwater reservoir located between latitudes $9^{\circ}25'38''$ and $16^{\circ}15'00''$ and longitudes $47^{\circ}41'42''$ and $43^{\circ}46'43''$, under the geomorphological unit called Western Bahia Plateau or São Francisco Plateau (IBGE, 2006).

In an area of $121,653 \text{ km}^2$, this aquifer has altitudes ranging from 300 to more than 1000 m above sea level (Figure 5.1) with steep escarpments and the presence of colluviums, comprising essentially sandy soils.

Figure 5.1 – (a) Location of the Urucuia aquifer system in central Brazil. (b) Digital elevation model of the Urucuia aquifer system domain. (c) Altimetry of the western Chapadão of Bahia geomorphological domain in different sections.

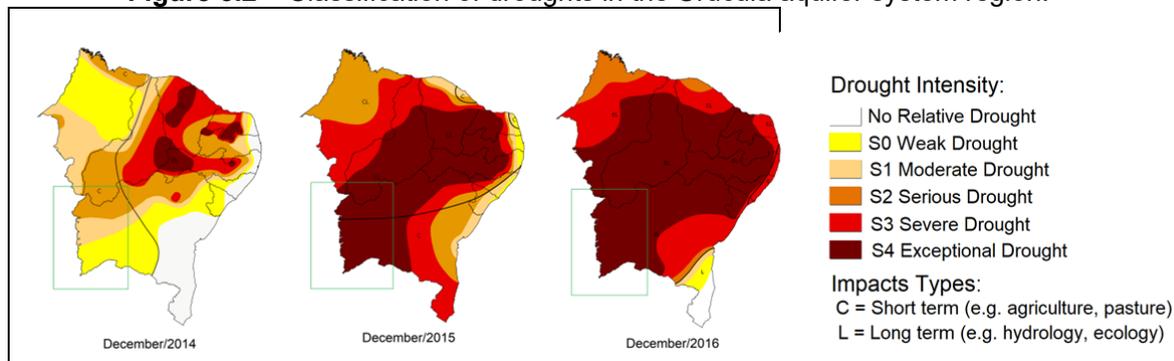


The climate in this region is classified as Tropical Savanna Climate (Aw), according to Köppen. It presents a wet season (excess water) corresponding to the summer, which occurs between October and April when the volume of precipitation is greater than evapotranspiration (Gaspar, 2006). The dry season occurs from May to September, encompassing the whole Winter in South Hemisphere, and evapotranspiration is greater than precipitation, causing water deficit (Gaspar, 2006). Therefore, during the period from May to September, the rivers of the region are maintained by the base flow, which according to Gaspar (2006), corresponds to a mean value of $1,35 \times 10^9 \text{ m}^3$, which on average is equal to 20% of the precipitation and 91% of the total streamflow, based on a data series from 1982 to 2002.

Also, according to Gaspar (2006), the average temperatures vary annually between 26° and 20° C, and the relative humidity of the air varies between 80% (December) and 50% (August).

However, in recent years, there have been climatic alteration, which points to an increase in the intensity of droughts in the region, as shown by the Drought Monitoring Project's maps (Figure 5.2) from the National Water Agency (ANA, 2015, 2016, 2017a). Two hypotheses are considered to explain this pattern: cyclical climatic variation arising from global climate change or the effect of agricultural expansion in the region, a point to be addressed in this work.

Figure 5.2 – Classification of droughts in the Urucuia aquifer system region.



Note: The figure shows the spatial spread of the drought intensity over Brazil's northeast region in December of 2014, 2015, and 2016. The green rectangle highlights the area where the Urucuia aquifer is located. Comparing the spatial distribution along the years, we observed that the drought intensity has been increasing in the region.

5.3 Materials and Methods

The average monthly rainfall series were initially obtained from the historical daily series of ten gauges in the area of the UAS. Table 5.1 displays general information on these. A simple descriptive statistical analysis was performed for these series to describe, evaluate, and summarize the data. Then, from these monthly precipitation data series, the annual precipitation data series for each station was defined and the representative regional monthly and annual precipitation series of the area.

Table 5.1 – Information from the historical series of ten pluviometric stations installed over the Urucua aquifer system area.

| Code | Name | Sub Basin | Municipality/State | Latitude (°) | Longitude (°) | Altitude (m) |
|----------|---------------------------------|-----------|--------------------------|--------------|---------------|--------------|
| 01145013 | Ponte Serafim Montante | 46 | Barreiras/BA | -11.8961 | -45.6119 | 713 |
| 01245014 | Fazenda Johá | 46 | Barreiras/BA | -12.1256 | -45.8108 | 725 |
| 01245015 | Roda Velha | 46 | São Desidério/BA | -12.7653 | -45.9439 | 761 |
| 01346006 | Fazenda Planalto | 45 | Correntina/BA | -13.7519 | -46.14 | 947 |
| 01346007 | Fazenda Prainha (Fazenda Antas) | 21 | São Desidério/BA | -13.3125 | -46.0631 | 824 |
| 01347000 | Cavalcante | 21 | Cavalcante/GO | -13.7969 | -47.4617 | 821 |
| 01445000 | Cajueiro | 45 | Januária/MG | -14.8361 | -45.1733 | 700 |
| 01447000 | Alto Paraíso de Goiás | 20 | Alto Paraíso de Goiás/GO | -14.1347 | -47.5117 | 1197 |
| 01447002 | São João d'Aliança | 20 | São João d'Aliança/GO | -14.7072 | -47.5236 | 1009 |
| 01546005 | Cabeceiras | 43 | Cabeceiras/GO | -15.8008 | -46.9247 | 900 |

Then, a local frequency analysis used in the precipitation series for each station and the regional averages (monthly and yearly) to assess the fulfilment of the criteria of independence, homogeneity, stationarity, and randomness, which are essential to verify whether the results are statistically valid (WMO, 2009). These criteria will be evaluated by the following non-parametric tests (Naghattini and Pinto, 2007). Randomness of values suggested by the test of NERC (1975), which indicates the presence of a structure or intervention of a non-random nature; Independence of values is assessed with the test proposed by Wald and Wolfowitz (1943), which verifies that no observation can influence the occurrence, or non-occurrence, of the next observation; Homogeneity of the sample is analyzed through the test by Mann and Whitney (1947), which considers an homogeneous sample when all elements come from one and identical population; and the Stationarity of a series is verified by the Spearman test described by NERC (1975), which is

associated with the non-alteration of statistical characteristics over time, which means that there are no trends, jumps and other properties.

Besides the adjustments of the series to the Log-Normal distribution (Naghetini and Pinto, 2007), which presents good results for annual values averages (Pinto and Alves, 2001), were evaluated by the Anderson-Darling (AD) adherence test, at the 5% level of significance, calculated by:

$$(P < p) = P(e^X \leq p) = P(X \leq \ln p) = \int_{-\infty}^{\ln p} fX(x)dx = \int_0^p \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\ln x^2}{2}} dx \quad (1)$$

The empirical distribution estimate was performed with descending order of the series and the calculation of the plot position using the Weibull formula:

$$(P > p) = \frac{m}{N+1} \quad (2)$$

Where: m is the order number and N the sample size. For the annual series, the hydrological year starting in September and ending in August was considered, and the data dates from September 1973 to August 2006, a total of 33 years.

With the distribution adjusted, it is possible to determine the return period of an observed rain height. The following correlation estimates the recurrence time or return period (T):

$$T = \frac{1}{(P>p)} = \frac{1}{1-(P<p)} \quad (3)$$

The return period is associated with the probability that an event will be equalled or exceeded in any given year.

Then, the values of monthly and annual precipitation average representative of the area were correlated with the respective indexes of teleconnections, AMO, PDO, and ENSO, obtained from the NOAA website (NOAA, 2019).

AMO is an index of natural variability, generated from anomalies in the sea surface temperature of the North Atlantic Ocean, in an interval of 5 to 8 decades (Santos, Siqueira and Melo, 2016), which cause changes in atmospheric circulation, based on three main processes: the atmospheric waves, the continuity of mass and the change of phases of the water (gaseous to liquid or solid). These anomalies are measured using the AMO Index, proposed by Raa *et al.* (2009) and Oldenborgh *et al.* (2012), and makes it possible to evaluate the occurrence of gradients responsible for

generating the phenomena called Atlantic dipole, which can be of positive or negative phase (Kayano and Andreoli, 2009). The AMO Index monthly series is calculated from 1856 to 2020 (NOAA, 2001).

Similar to AMO, the PDO teleconnection consists of a climatic phenomenon observed in the North Pacific Ocean, where a Sea Surface Temperature (SST) pattern is identified for 20 to 30 years, and which seems to coincide with the cooling periods (negative values) and warming (positive values) of the waters. It results in changes in marine ecosystems, in addition to affecting the currents' trajectories (Ndehedehe; Ferreira, 2020) as it affects the temperatures of the coastal sea and the continental surface air from Alaska to California. This variability is verified by the Decadal Oscillation Index, which is a function of the monthly anomalies of the sea surface temperature over the North Pacific (about 20°N) after removing the global average temperature of the sea surface (Molion, 2005; Buffon and Binda, 2014). The PDO Index monthly series was considered in this study from 1854 to 2020 (NOAA, 2016).

ENSO is a periodic variation in the tropical Pacific Ocean of winds and sea surface temperature, which occurs in the warming phase and accompanies the high pressure of the air surface (Walker cell changes), affecting the climate of a large part of the tropics and subtropics. ENSO can be assessed by the Southern Oscillation Index, which is a standardized index based on the differences in sea level pressure observed between Tahiti and Darwin in Australia, and the prolonged periods of negative oscillation values coincide with ocean waters abnormally warm throughout the eastern tropical Pacific, typical of El Niño episodes. The South Oscillation Index series obtained was monthly from 1951 to 2020 (NOAA, 1999).

It was also used to characterize the intensity of an ENSO event, the multivariate index, which consists of a complex interaction of a variety of climatic systems, and which is considered the most comprehensive index for monitoring El Niño, as it combines the analysis of multiple meteorological and oceanographic components (Mazzarella, Giuliacci and Scafetta, 2013). The series of the Multivariate Index obtained was monthly from 1979 to 2020 (NOAA, 1999).

The climate indices were correlated with monthly and annual precipitation data from stations located in the UAS, in pairs, and for periods defined based on the phases of each index. The correlation was evaluated by analyzing the significance of the differences and using the Student's t-test, and the results were considered

statistically significant with a p-value ≤ 0.05 . This is because the p-value depends directly on the data series and presents a quantitative measure that assists the decision-making process as evidence that if the null hypothesis (H_0) is true, then the chance of random variation will be the only explanation for sample differences.

Therefore, a reasonable interpretation of the p-value (Arsham, 1988) shows that there is robust evidence against H_0 if $P < 0.01$; if $0.01 \leq P < 0.05$ there is moderate evidence against H_0 ; if $0.05 \leq P < 0.1$ there is suggestive evidence against H_0 ; but if $P \geq 0.10$ there is little or no real evidence against H_0 .

After analysing the correlation of the monthly and annual precipitation data with the values of the climate indices, the series of maximum daily rainfall over the Urucuia Aquifer System was determined, and the 15 largest events were chosen to analyse the retroactive trajectories of the air masses, and so try to estimate which atmospheric systems are operating and their origin.

The retroactive trajectories of the air masses were estimated by the Lagrangian approach, which determines the water balance (Evaporation – Precipitation), for a given period of time, from the sum of the humidity changes (Sodemann; Schwierz; Wernli, 2008), that is:

$$\frac{Dq}{Dt} \approx \frac{\Delta q}{\Delta t} = E - P \quad (4)$$

Knowing that the moisture content is interpolated to its position every time (Stohl and James, 2004), water vapour gains and losses are measured by changes in specific humidity (Δq) over time (Δt). The rates of increase (x) and reduction (y) of specific humidity occur with the gains and losses of water vapour along the particle's trajectory ($\Delta q = x - y$).

So, for a large number of particles (K) passing over an area (A), the equation of (4) can be written as follows:

$$E - P = \frac{\sum_{k=1}^K (x - y)}{A} \quad (5)$$

This Lagrangian modelling for trajectory determination was performed using the HySplit model (Stein *et al.*, 2015), which uses the data set of the reanalysis project carried out by NOAA to produce new atmospheric analyzes using historical data (from 1948) and also produce analyzes of the current atmospheric state (Climate Data Assimilation System).

The model estimates (at 1-degree resolution) and reports the position of the air packages (latitude, longitude, and height), pressure, and specific humidity in grams of water vapour per kilogram of air (g/kg), thus forming the trajectories of the air masses (Santos and Lima, 2019).

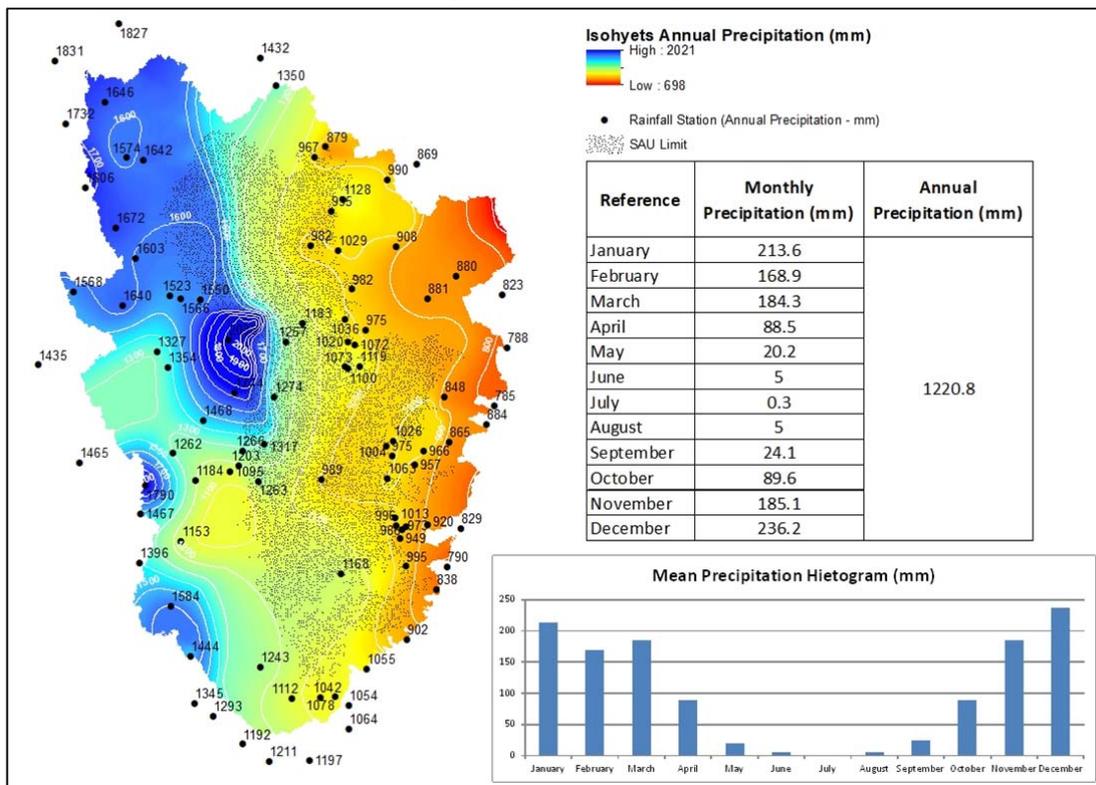
The trajectories were calculated for the days that precipitation occurred above 125 mm in the Urucuia aquifer region, a criterion of rainfall greater than the 3rd quartile of the data series, which corresponds to a limit commonly used in similar studies (Kim *et al.*, 2004; Amato and Hopke, 2012; Alves *et al.*, 2018). The trajectories were started at heights from 10 to 6010 m, at intervals of 400 m, above ground level, and at the times of 12 h, 18 h of the previous day and 0 h and 06 h of the day of measurement, because all the measurements take place at 07 h and refer to the accumulated rainfall of the last 24 hours. The heights were defined based on previously performed works (Santos *et al.*, 2018). The trajectories were simulated retroactively in time, that is, from the specification of the destination coordinates (sampling point) the trajectories are plotted from the possible points of origin, depending on the climatic conditions, in a specified time interval (1-hour interval for 10 days or 240 hours), to the destination (Back Trajectory). The trajectory data show, for each storm, the path that the particle travelled defined considering time, latitude, longitude, and heights of the trajectory, informing the respective pressure and specific humidity of the particle, which allows a better analysis of the data.

5.4 RESULTS

5.4.1 Characterization of precipitation variability in the Urucuia Aquifer System region

The region in which the Urucuia Aquifer System is inserted is characterized by the rainy period from October to April, but in April, the rains begin to decrease, initiating the dry period, as can be seen in the (Figure 5.3), where monthly precipitation average data from September 1973 to August 2006 were used, in 94 pluviometric stations located on and near the area. The wettest quarter is December to February with a quarterly average of 619 mm, and the driest is from June to August with a quarterly average of 10 mm.

Figure 5.3 – Analysis of annual precipitations average over the Urucua aquifer system region (1973 to 2006).



Note: Precipitation in the region begins in September, but the rainiest period occurs between October to April. The greatest precipitated volumes occur from west to east. The largest rainfall was observed in Ponte Alta do Bom Jesus station, located in the Tocantins River's Hydrographic Region. Over Urucua Aquifer System, the average annual precipitation is equal to 1220.8mm, defined between 1973 and 2006.

This temporal variability of precipitation was analyzed by the spatialization of precipitation information from the National Hydrometeorological Network stations, from September 1973 to August 2006. This spatialization resulted in a surface or "raster", where monthly rainfall estimates are made for all cells to generate a continuous map. In this work, the Kriging method was chosen, which according to (Murara, 2019), is the most used method for spatialization of climatic data since it creates more uniform variations, not presenting variations and smoothing its representation since it homogenizes the information presented. After using the Rainfall Anomaly Index (RAI) methodology, proposed by (Rooy, 1965), which characterizes the existence of dry periods (precipitation below the historical average) and rainy periods (annual precipitation above average), in addition to the intensity of the phenomenon in the period (Kraus, 1977; Souza, Albuquerque and Lopes, 2000; Freitas, 1998; Araújo, Moraes Neto and Sousa, 2009; Cruz *et al.*, 2013; Moraes,

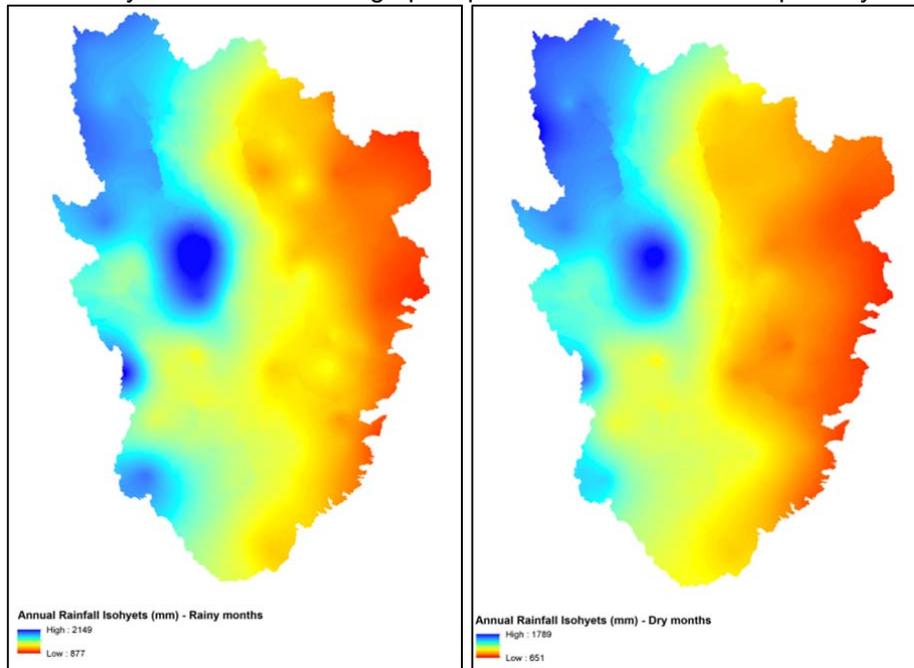
2014; Alves and Araújo, 2015; Dutta *et al.*, 2015; Noronha, Hora and Silva, 2016; Hänsel, Schucknecht and Matschullat, 2016; Cerqueira, Santos and Aquino, 2018; Lima *et al.*, 2019; Surendran *et al.*, 2019), the analysis showed 12 rainy years and 21 dry years in the region, considering the hydrological year beginning in September and ending in August of the following year, since 98.6% of the rain that occurred in the region above 2 mm, occurred between September to May of the following year and, besides, evaluating the precipitated volume throughout the period only 0.95% fell on UAS, between May and August.

The isohyets map of annual rainfall average in the region (Figure 5.3) assists in the evaluation of the behavior of annual rainfall average, showing that the rainfall in the western portion of the UAS is higher, especially in the area of the “Ponte Alta do Bom Jesus” station, which presents a higher value of average annual precipitation compared to the other values of the analyzed rainfall stations. In contrast, the eastern portion presents precipitation with lower annual averages, reaching values below 1000 mm in the vicinity of the area in which the aquifer is located. This spatial variation in rainfall is attributed to the orographic control of rainfall in which air masses are discharged progressively from west to east. It presents a niche of the greatest rainfall occurring around Ponte Alta do Bom Jesus Station, which reaches an average annual rainfall of 2,033 mm, much higher than the region's average of 1,200 mm.

Considering as a dry year, the years with annual precipitation below the historical average, and the years with annual precipitation above, such as rainy years, the variability of the spatialization of the precipitated volume in the dry and rainy years was analyzed, and the result showed that the spatialization of the rains demonstrated no difference between the dry or rainy years (Figure 5.4) in the region.

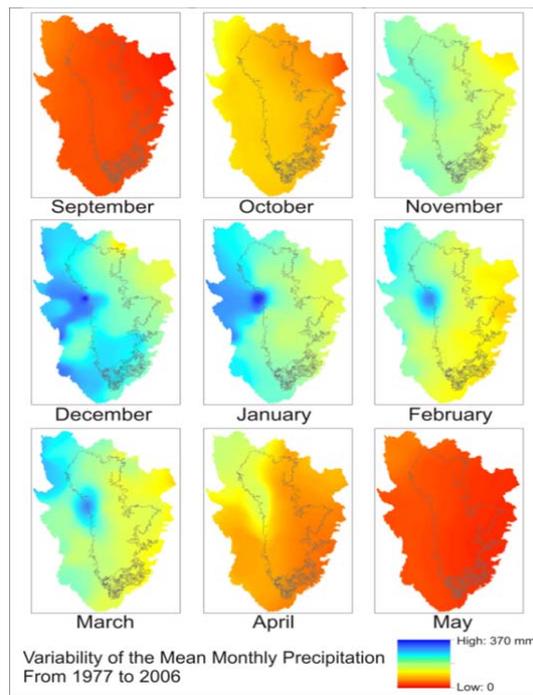
Moreover, from the evaluation of the precipitation spatialization in all months of the year, observing the existence of variability between the rainy and dry months, it is concluded that in the driest period of the year, between May and September, there is no variation in the spatialization of rain in the region, that is, it is uniform in the investigated area. However, in the wettest period of the year, between October and April, it is observed that the western region presents a greater volume of precipitation, especially in the region around the municipality of Ponte Alta do Bom Jesus (Figure 5.5).

Figure 5.4 – Analysis of annual average precipitations in the Urucuia aquifer system region.



Note: Observe the comparison of the average annual rain's spatialization between dry and rainy years. In reference to the monthly historical average, dry years were lower monthly rainfall, and in rainy years observed higher monthly rainfall. Not observed differences between the occurrences of rains regardless of the dry or rainy year.

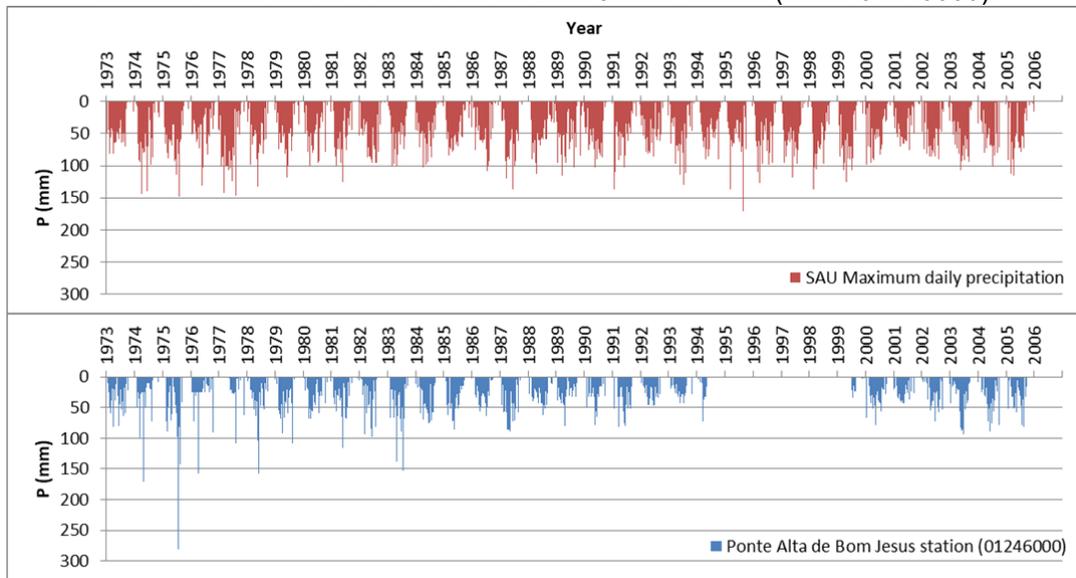
Figure 5.5 – Analysis of monthly precipitations average in the Urucuia aquifer system region.



Note: Spatialization shows that between May and September, observed no major variations over the UAS region. The most evident changes occur between December and March. Evidence of the arrival of rain from west to east.

However, concerning the precipitation of the “Ponte Alta do Bom Jesus” station (code: 01246000), where the concentration of precipitation occurs (Figures 5.3, 5.4, and 5.5), it was observed that the behaviour of precipitation is different, with different mean and variance, such as show the daily hyetograms that compare the rainfall on the UAS and with that observed at the “Ponte Alta do Bom Jesus” station – code: 01246000 (Figure 5.6). Also, analyzing the series statistically by the t-test, assuming different variances, the results show that the data did not present correlation (p -value \gggg 0.05).

Figure 5.6 – Daily hyetograms comparing the precipitation over the Urucuia aquifer system and that observed at “Ponte Alta do Bom Jesus” station (code: 01246000).



Note: Note through the daily hyetograms that precipitation over the Urucuia aquifer system is different from the frequency observed on the station, which is installed around the UAS region, not on it.

Geographically, the “Ponte Alta do Bom Jesus” station is not located on the UAS. However, on the slope area, which circulates the entire plateau, it was understood that the meteorological systems phenomena, which may influence and/or generate precipitation at this point, are not the same as those acting in the rains over the aquifer. Therefore, the precipitation in this place must be analyzed separately.

Another issue is that, depending on the location of this station, the rains that occur in this location should not contribute to the recharge of the Regional Free Aquifer, which occupies the largest area in the basin, since the variable static level of this subsystem, varies from 4 to about 50 meters.

The “Ponte Alta do Bom Jesus” station is located at an altitude of 518 meters, while the height of the plateau closest to this location is at an altitude of 903 meters, another at an elevation of 385 meters. Therefore, if the rain in this place contributes to the UAS recharge, it will only be for the free Deep Aquifer subsystem's recharge, which can reach depths greater than 100 m.

5.4.2 Annual and monthly rainfall averages over the Urucuia Aquifer System area

The monthly precipitation series over the Urucuia aquifer show that the differences between the means and the variances are not significant, according to the tests for samples assuming equivalent means (z test) and equivalent variances (t-test), with the true null hypothesis (H_0) claims that random variation will be the only explanation for sample differences ($p\text{-value} < 0.05$). But, when we compare the monthly flows series of one station with the other stations series, the results found were not statistically significant ($p\text{-value} \geq 0.05$), because the lowest p-value found was equal to 0.057.

The stations' series of monthly data were correlated in pairs through the coefficient of determination (R^2) to adjust a generalized linear statistical model. Thus, it was found 45 R^2 values for correlations with monthly data, with the lowest value being 0.6564 and the maximum 0.8336, for an average R^2 of 0.7455, which allows to conclude that there is a good correlation between the series of monthly precipitation of the stations located on the UAS in the period of 33 years (1973 to 2006), which represents the main source of recharge for this aquifer.

Therefore, the station series of monthly precipitation data showed equivalent averages and variances, in addition to a good correlation, when correlated with the regional monthly precipitation series, which the lowest R^2 found was 0.8352, indicating a good correlation.

Evaluated by the series formed by each month, the monthly data were divided into twelve series for each station. The series was assembled month by month. That is 120 series analysed. Nine series did not approve: three in independence teste (July series from Ponte Serafim – Montante station, July series from Fazenda Johá station and June from Fazenda Prainha station); two in randomness test (May and June series from Cabeceiras station); and four in stationarity test (June series of

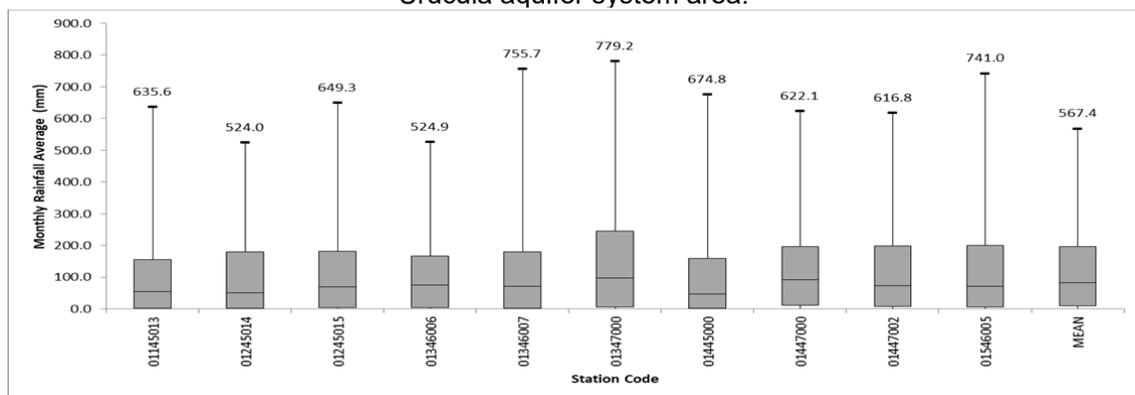
Ponte Serafim – Montante station, and October series of Cavalcante, Alto Paraíso de Goiás, and São João d'Aliança stations).

The homogeneity test as not evaluated due to the small size of the series. However, even passing the criteria of independence, randomness, and stationarity, all series from May to September were not accepted by the Anderson-Darling (AD) adherence test, at the 5% significance level, to be modelled due to the Log-Normal distribution, this occurs precisely due to the occurrence of the dry season in the region, where rainfall is not frequent.

In May and September, which are the months of the beginning of the descent and rise of precipitated volumes, it was possible to adjust Gumbel extremes' distribution, being accepted by the Anderson-Darling (AD) adhesion test, to the level of 5 % of significance. For the series of November, December, January, and February, the null hypothesis was accepted by the AD test for 5% of significance, showing that the Log-Normal distribution can model the series of these months.

Also, analyzing the series of mean data on the UAS, month by month, it was observed that the Log-Normal distribution could also model the series for December, January, February, March, and April since the null hypothesis was accepted by the AD adherence, at the 5% level. The data of the descriptive statistics of the monthly precipitation series are shown in Figure 5.7.

Figure 5.7 – Box plot of the ten series of monthly rainfall data for stations installed over the Uruçua aquifer system area.

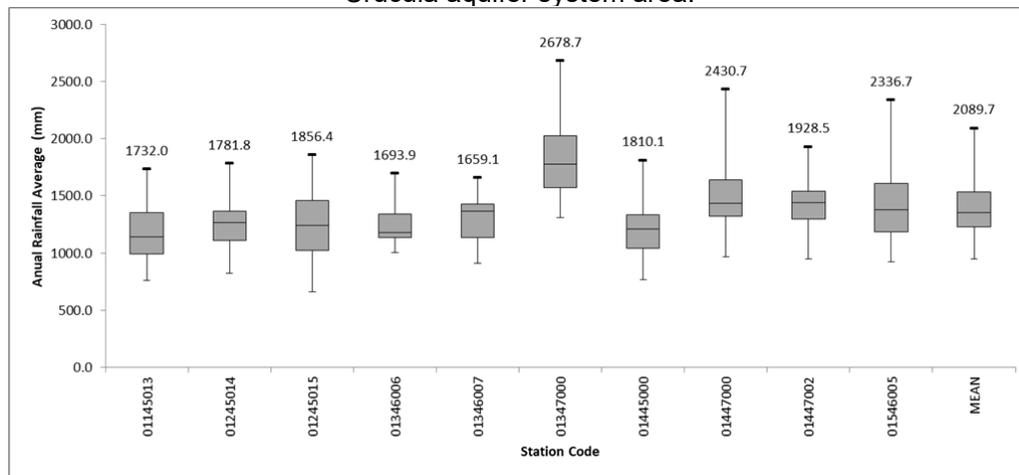


Note: The higher monthly rainfall totals range from 524 mm to 780 mm. However, most of the observed precipitations are less than 250 mm.

The total annual precipitation data series of each station on the UAS, in addition to the series of regional annual total precipitation, over the period of 33 years, were also evaluated.

It is concluded that the series are independent and stationary, except for the “Fazenda Planalto” station (code: 01346006), which presented dependent values and presented non-stationary values on “São João d'Aliança” station series (code: 01447002) and regional annual totals series (Figure 5.8 and Table 5.2).

Figure 5.8 – Box plot of the ten series of annual rainfall data for stations installed over the Urucua aquifer system area.



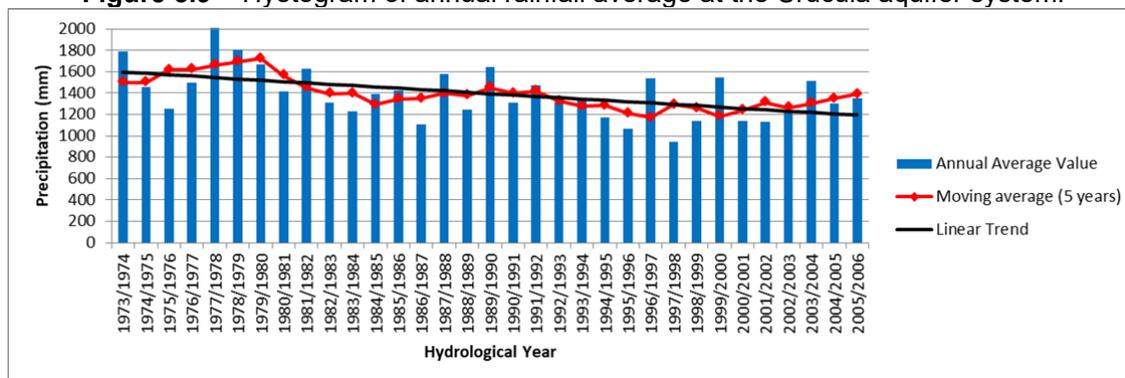
Note: The lowest rainfall values ranged from 660 mm to 1312 mm. Furthermore, the highest occurred between 1659 mm to 2679 mm ranges. However, most of the observed precipitations were less than 1640 mm.

Table 5.2 – Descriptive statistics of the ten series of annual rainfall data for stations installed over the Urucua aquifer system area and the series of regional annual total precipitation.

| Code Station | Name Station | Test Statistics | | Test Result | |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------------|------------|--------------------------|----------------------------|
| | | Independence | Stationary | Independence | Stationarity |
| 01145013 | Ponte Serafim - Montante | 1.09 | -1.56 | Independent Observations | Stationary Observations |
| 01245014 | Fazenda Johá | -1.81 | 0.09 | Independent Observations | Stationary Observations |
| 01245015 | Roda Velha | -1.51 | -1.22 | Independent Observations | Stationary Observations |
| 01346006 | Fazenda Planalto | -2.04 | -0.05 | Dependent Observations | Stationary Observations |
| 01346007 | Fazenda Prainha (Fazenda Antas) | 0.80 | -0.90 | Independent Observations | Stationary Observations |
| 01347000 | Cavalcante | 0.91 | -1.39 | Independent Observations | Stationary Observations |
| 01445000 | Cajueiro | -0.71 | -0.69 | Independent Observations | Stationary Observations |
| 01447000 | Alto Paraíso de Goiás | 1.39 | -0.81 | Independent Observations | Stationary Observations |
| 01447002 | São João d'Aliança | -0.33 | -2.79 | Independent Observations | No Stationary Observations |
| 01546005 | Cabeceiras | 0.56 | -0.59 | Independent Observations | Stationary Observations |
| Annual Mean Regional Series | | 1.46 | -2.61 | Independent Observations | No Stationary Observations |

Nevertheless, all the annual totals indicated a linear downward trend, represented by the hyetogram of the series of regional annual total precipitation (Figure 5.9). The Mann-Kendall test was applied to define whether there is a statistically significant time trend, where the p-value of the test less than the level of significance (0.10, 0.05 and 0.01), indicates statistically significant evidence to reject the null hypothesis H_0 , which indicates an increasing trend in the data (positive S) or decreasing (negative S) (Chiew and Siriwardena, 2005; WMO, 2000). And results indicated that there is and that a large part of the differences between the values in the time series was negative, pointing to a downward trend over time ($S = -172$ and $p\text{-value} = 0.004$). This downward trend was also observed in the precipitation series between 1980 and 2015, according to Costa *et al.* (2019).

Figure 5.9 – Hyetogram of annual rainfall average at the Urucuia aquifer system.



Note: The series of annual totals indicated a linear downward trend, represented by the hyetogram of the series of regional annual total precipitation.

From the total annual rainfall series evaluated by the Anderson-Darling (AD) adherence test, at the 5% level of significance, eight accepted to modelled by the log-normal distribution (Naghetini and Pinto, 2007), with the parameters of position (β) and form (α) calculated by the L-moment method (Hosking and Wallis, 1997).

This information makes it possible to calculate the quartiles associated with different return times or calculate the return time for each annual quartile, as shown in Table 5.3.

Failure in the independence and stationarity tests implies the non-acceptance to modelled by the log-normal distribution; therefore, “Fazenda Planalto” and “São João d’Aliança” stations do not appear in Table 5.3. The statistical tests showed that the annual precipitation series is independent and stationary.

Nevertheless, when dividing the series half, with 1989/1990 hydrological year of as the series center, the analysis shows that up to 1989/1990, 73% of the rainfall had a return time of up to 5 years and 27% greater than six years. After this hydrological year, 92% of the rainfall had a return time of up to five years and only 8% greater than six years. That represents an 18% decrease.

Table 5.3 – Local frequency analysis results of the annual rainfall series from the stations installed over the Uruçuia aquifer system area.

| Station Code | Station Name | Parameters of the Log-Normal Distribution Model | | Annual Precipitation for Return Time Equal 100 Years (Tr = 100 years) | Mean Annual | | Maximum Annual | | Minimum Annual | |
|--------------|------------------------------|---|----------|--|-------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|
| | | Location | Scale | | P (mm) | Tr (y) | P (mm) | Tr (y) | P (mm) | Tr (y) |
| | | ξ | α | | | | | | | |
| 01145013 | Ponte Serafim - Montante | 7.0560 | 0.2205 | 1937.4 | 1186.7 | 2 | 1732.0 | 29 | 762.4 | 1 |
| 01245014 | Fazenda Johá | 7.1140 | 0.1805 | 1870.3 | 1247.7 | 2 | 1781.8 | 51 | 824.3 | 1 |
| 01245015 | Roda Velha | 7.1102 | 0.2465 | 2172.5 | 1258.2 | 2 | 1856.4 | 22 | 660.8 | 1 |
| 01346007 | Fazenda Prainha (Faz. Antas) | 7.1656 | 0.1719 | 1930.6 | 1311.4 | 2 | 1659.1 | 13 | 907.5 | 1 |
| 01347000 | Cavalcante | 7.4922 | 0.1642 | 2628.3 | 1817.4 | 2 | 2678.7 | 137 | 1311.6 | 1 |
| 01445000 | Cajueiro | 7.0428 | 0.2188 | 1904.2 | 1170.5 | 2 | 1810.1 | 55 | 765.7 | 1 |
| 01447000 | Alto Paraíso de Goiás | 7.2830 | 0.2040 | 2339.4 | 1485.4 | 2 | 2430.7 | 168 | 964.3 | 1 |
| 01546005 | Cabeceiras | 7.2315 | 0.2261 | 2339.0 | 1415.6 | 2 | 2336.7 | 99 | 921.1 | 1 |

Analyzing also the average of all annual rainfall, it is observed that there is a significant difference between the period up to the hydrological year 1989/1990 and the subsequent period, which leads to the assumption that the existence of external climatic phenomena may influence some of the precipitation characteristics, mainly volume and intensity, such as, for example, meteorological systems and teleconnections, which would imply considerable changes in water availability, even so, the issue of aquifer recharge.

5.4.3 Comparison of total regional precipitations (annual and monthly) with Climate Indices

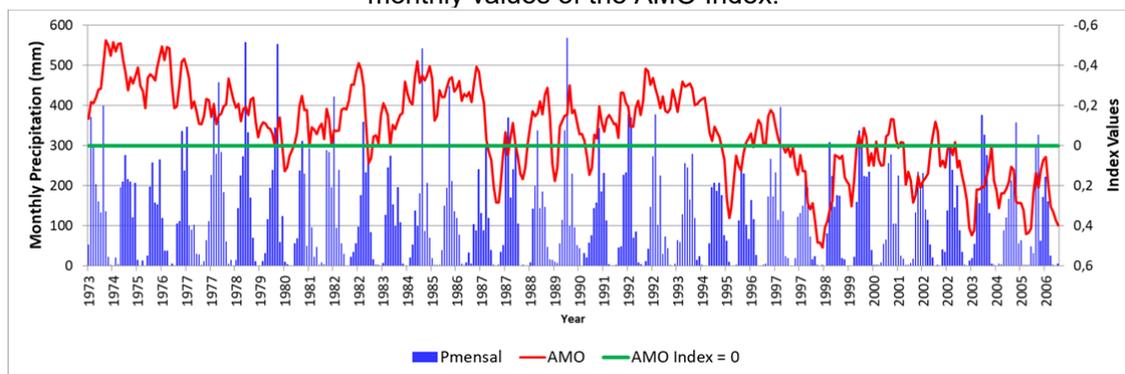
Analyzing the North Atlantic SST anomaly time series, Enfield, Mestas-Nuñez and Trimble (2001) found that the positive (warm) AMO phase occurred during the periods 1860-1885 and 1925-1965 and the negative (cold) AMO phase, during the periods 1895-1924 and 1970-1990. And the downward trend, shown in the hyetogram in Figure 5.9, shows that the greatest amounts of rainfall occurred between 1973 and 1990, a period in which the negative (cold) phase of the AMO

occurred, according to other studies (Raa *et al.*, 2009; Oldenborgh *et al.*, 2012), and for this reason, this was the first teleconnection, whose index was compared with regional precipitation data.

However, analysis of the AMO index series showed that the negative AMO phase occurred until 1993 and, only in 1994, a positive AMO phase started, a fact confirmed in other studies too (Valdés-Pineda, Cañón and Valdés, 2018). Thus, and considering that the series are independent and stationary, the analyzes used the complete series to compare the indexes without links to the hydrological year of 1989/1990.

The analysis compared the precipitation annual with the average AMO index by means of correlation analysis, and the results showed statistical significance (p -value ≤ 0.03), revealing the potential teleconnectivity of the climatic circulation patterns with average annual precipitation over the UAS. Correlating also the monthly precipitation average values in the region with the AMO indices values (Figure 5.10), a p -value less than 0.001 is obtained for the regional data series and less than 0.025 for the series of monthly data of the stations, proving a strong correlation between this teleconnection and precipitation in the region. Therefore, these results suggest a correlation between AMO and total annual and monthly rainfall in the region where the Urucua aquifer occurs.

Figure 5.10 – Graph of monthly rainfall in the Urucua aquifer system region and of the monthly values of the AMO Index.



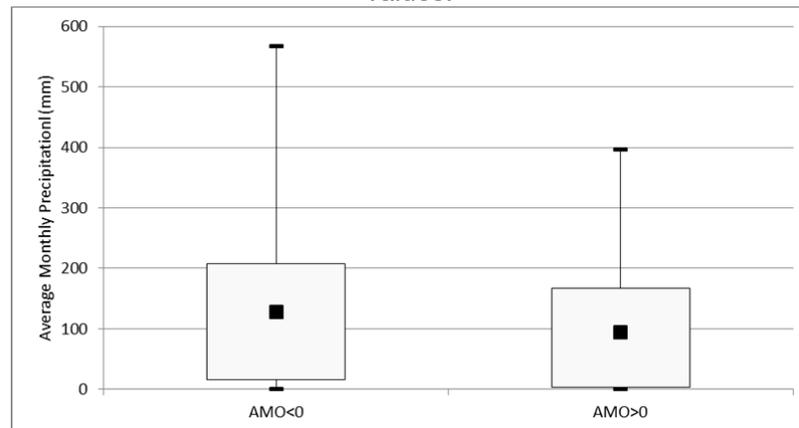
Note: Comparing the monthly precipitation values with the average AMO index, the results showed that they were statistically significant (p -value ≤ 0.03), revealing the potential teleconnectivity of the climatic circulation patterns with average annual precipitation over the UAS.

Searching for more evidence of this correlation, the series of monthly rainfall that occurred when the AMO index was positive was compared with the series of

rainfall that occurred when this index was negative, using the t-test at the 0.05 level of significance. In this case, it is concluded that there is a significant difference between the averages of precipitation that occur when the oscillation index is positive or negative (p-value < 0.008).

Based on this evidence, the boxplot graph was proposed (Figure 5.11), where the differences between the means (123.3 and 94.9 mm), the 3rd Quartiles (207.5 and 166.9 mm), and the 1st Quartiles (15.3 and 2.7 mm) can be observed, that suggest interference of AMO in the negative and positive phase of the dipole. The medians (99.5 and 51.9 mm) also show this difference. This means that there is, in the positive phase of the dipole, inhibition of cloud formation, decreasing precipitation, and causing dry periods. This is because the North Tropical Atlantic waters become warmer, and the Equatorial Atlantic and Tropical South waters become colder. In contrast, in the negative phase of the dipole, the North Tropical Atlantic waters become colder and the waters of the South Tropical Atlantic warmer, generating an increase in upward movements over these regions, intensifying the formation of clouds and increasing rainfall.

Figure 5.11 – Box plot illustrating monthly precipitation for positive and negative AMO index values.



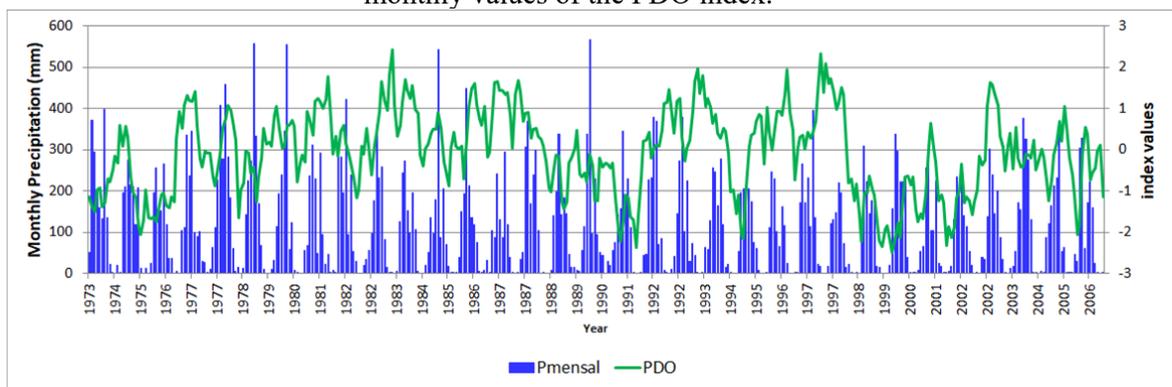
Note: This graph suggests the AMO interference in precipitation over the UAS region because the differences between the means (123.3 and 94.9 mm), the 3rd Quartiles (207.5 and 166.9 mm), and the 1st Quartiles (15.3 and 2.7 mm) can be observed, depending on the negative or positive phase of the dipole.

Regarding the PDO phenomenon, the mean precipitation series over the UAS did not show any correlation (Figure 5.12), as the results were not statistically significant, neither with the annual data, where p-values greater than 0.7 were observed nor with the data monthly, whose lowest p-value was greater than 0.1,

since p -values ≥ 0.10 indicate little or no real evidence of correlation (Arsham, 1988). Still looking for some correlation, the series analysis was performed according to the hot or cold phase of the PDO.

As several authors (Mantua *et al.*, 1997; Molion, 2005; Kayano and Andreoli, 2009; Alves, 2012) stated that the cold phase of the PDO occurred between 1947 and 1976 and the warm phase between 1977 and 1998, it was correlated monthly and annual rainfall with the PDO index for the period between 1947 and 1976, then for the period between 1977 and 1998, but no correlation was also obtained, resulting in a p -value ≥ 0.8 .

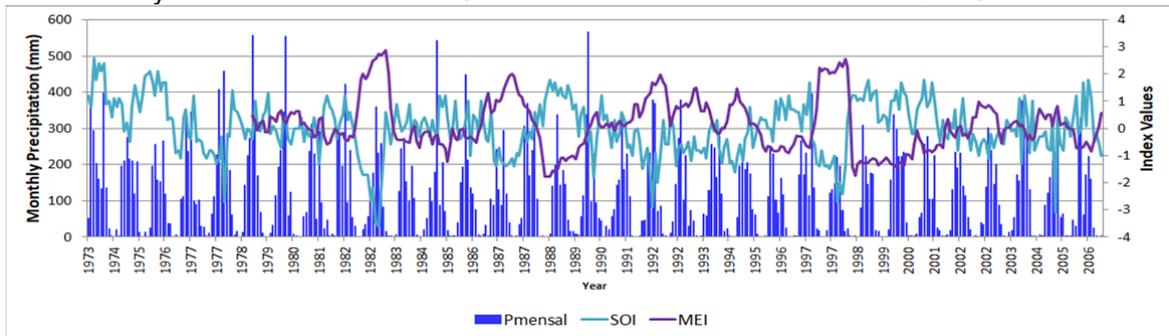
Figure 5.12 – Graph of monthly precipitation in the Urucuia aquifer system region and of the monthly values of the PDO index.



Note: The mean precipitation series over the UAS did not correlate with the PDO phenomenon, as the results were not statistically significant, neither with the annual data nor with the data monthly, whose lowest p -value was greater than 0.1, indicating little or no real evidence of correlation.

The regional monthly and annual precipitation series also did not correlate with the Southern Oscillation Index, as the results were also not statistically significant, with p -value ≥ 0.5 for monthly data and p -value ≥ 0.3 for the annual data (Figure 5.13). The Multivariate ENSO Index application also did not show any correlation since the p -values were greater than 0.7. That is, they were not statistically significant.

Figure 5.13 – Graph of monthly precipitation in the Urucuia aquifer system region and of the monthly values of the Southern Oscillation Index and the Multivariate ENSO Index.



Note: The regional, monthly, and annual precipitation series also did not correlate with the Southern Oscillation Index ($p\text{-value} \geq 0.3$), and the Multivariate ENSO Index also did not show any correlation either ($p\text{-values} \geq 0.7$). The result indicates that the correlation was not statistically significant.

This is a noteworthy point since no correlation was detected that indicated ENSO and PDOs influence on the precipitation of the studied area. However, some of the studies mentioned above indicate that the negative phase of these indices is favour precipitation over the Northeast of Brazil because there is an increase in rainfall intensity along the rainy season.

In their positive phase, the PDOs and ENSO there seems to occur a greater number of El Niño episodes and more intensely, and a lower number of La Niña events, which occur less intensely. The opposite occurs in the negative phase, where there is a higher occurrence of La Niña episodes, which tend to be more intense, and a lower frequency of El Niños, which tend to be short and fast.

5.4.4 Comparison of the Urucuia Aquifer System total, annual, and monthly rainfall patterns with meteorological systems

Some of the studies previously mentioned have shown that the ENSO and PDO teleconnections also greatly influence meteorological systems, as they affect the longitudinal positioning of the ascending branches of the Walker Cell (Wang, 2004). This is because, in the hot phase, its main ascending branch is positioned over the warm waters of the Pacific and causes subsidence and high pressure over the North of South America, blocking the Intertropical Convergence Zone further north and the cold Fronts of the Southern Hemisphere and the South Atlantic Convergence Zone (ITCZ) further south, which causes severe droughts in the region. In the cold phase, there is an intensification of the Walker Cell's ascending branches

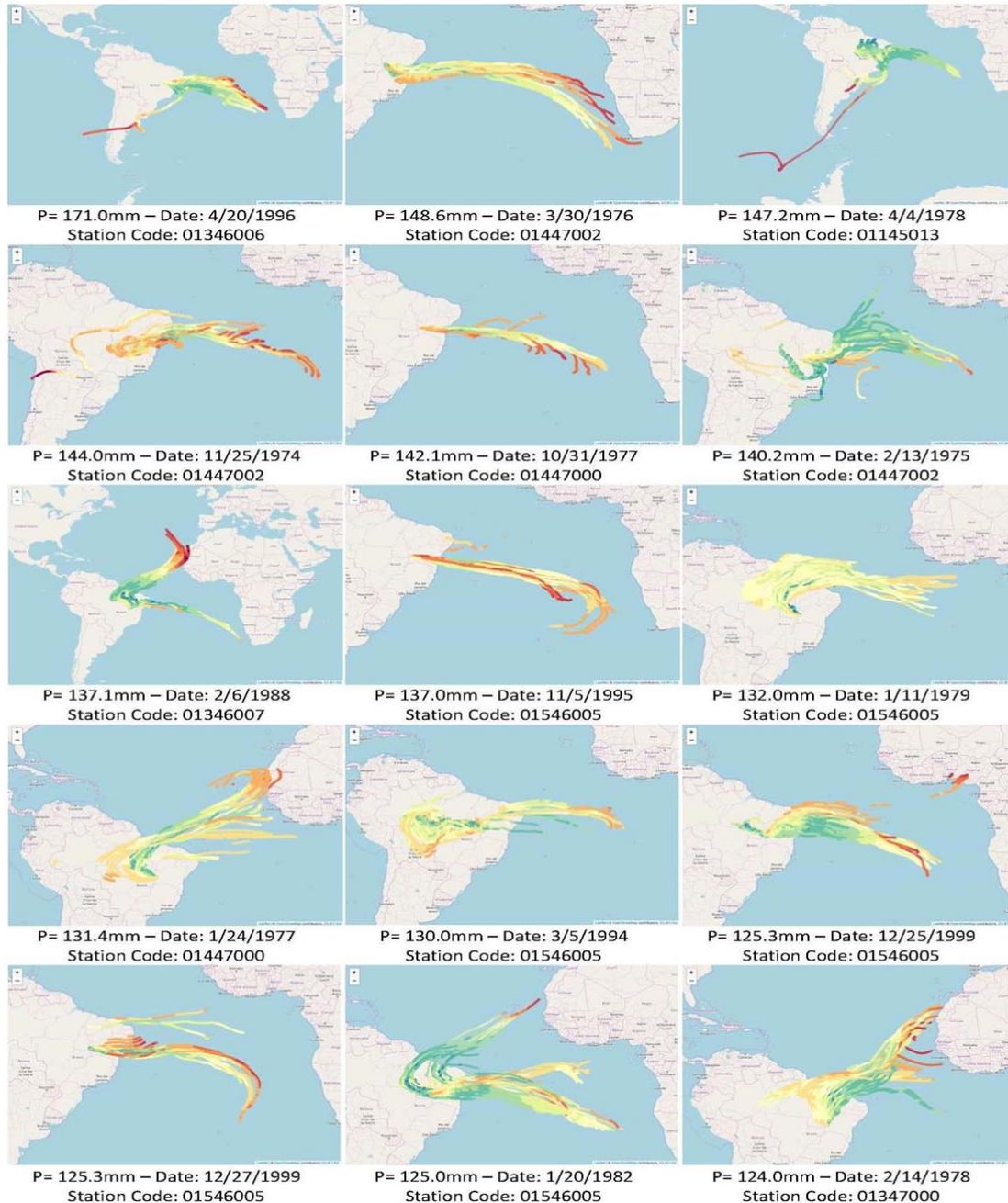
on the continents, increasing the rainfall totals. Therefore, if it was not possible to detect an influence between the ENSO and the PDOs with the precipitation series, it came up that it may be possible to define a relationship between the series and the meteorological systems that act on the UAS, which was investigated through simulation based on the HySplit model.

However, it is important to note that the HySplit model informs rain trajectories according to time, day, and location, so it was necessary to evaluate the daily rainfall in the stations to detect the greatest daily rainfall and where it occurred. In the assessment of the daily rain series, 12,053 days were analysed in 10 stations and found 24% of failures in the data series and 56.3% of the days have no rain occurrences (precipitation equal to zero).

For the other 19.7% of the data, on 54.7% of them precipitation were less than 10 mm, on 42.7% were greater than 10 mm and less than 60 mm and only 2.6% were greater than 60 mm. In other words, only 618 rain records greater than 60 mm verified on the Urucuia Aquifer System. In the period analysed from September 1973 to August 2006, there are only 49 rain daily records greater than 100 mm, equivalent to only 0.2% of observation records in the region (Figure 5.14).

To define from which precipitation value the daily data would be analyzed by the HySplit model, the series of maximum annual precipitation of the stations was evaluated, and it was found that for the recurrence time of 1 year, the rain would be 74 mm. Thus, all precipitations equal to or greater than 70 mm were analysed. That is, 22,400 trajectories were analyzed (350 dates * 16 times * 4 times).

Figure 5.14 – Trajectories determined by the HySplit model of the 15 largest daily precipitation events on the Urucuia aquifer system.



Note: The color scale used is associated with the specific moisture content of each trajectories moment. A more bluish coloration represents the highest moisture content trajectories and is generally below 2000 m of altitude. The opposite occurs with the reddest trajectories, which have less moisture content and are generally at higher atmospheres levels. Moreover, it is possible to observe different types of storms generated by different atmospheric systems, but all coming from the South Tropical Atlantic Ocean. About the systems, observed indication a direct influence from the South Atlantic Convergence Zone (1988 to 1977), the predominance of the Amazon systems with a strong contribution from systems in the Equatorial Atlantic Ocean (1978), the performance of High-Level Cyclonic Vortexes (1982), and the performance of cold fronts from the Southern or Indian Ocean (1976).

With this assessment, it was possible to observe that the specific humidity of the air and the pressure decrease exponentially with the altitude, but in the period from 1973 to 1990 (negative AMO) the specific humidity was 26% higher than in the period from 1990 to 2006 (positive AMO), which shows a greater amount of water vapor in the atmosphere in the period of negative AMO concerning the period of positive AMO. The trajectory data showed no variation between the values of specific air humidity and atmospheric pressure with the increase or decrease in the total precipitation, as the results were not statistically significant, with a p -value ≥ 0.5 .

On average, the trajectories along the negative AMO phase were at higher latitudes closer to the ITCZ, showing that this atmospheric system may have an influence on precipitation during the negative phase of the AMO. However, in the phase of positive AMO, on average, the trajectories latitudes were lower, closer to the Tropic of Capricorn, suggesting that the rainfall received little influence from ITCZ in the phase of positive AMO, and perhaps more influence from the Atlantic Subtropical Anticyclone Sul (ASAS), which transport heat and humidity from the Atlantic Ocean to the interior of Brazil.

In the positive AMO phase, the trajectories presented anticlockwise snail aspects around the initial coordinates, mainly at higher altitudes, suggesting the presence of anticyclonic vortexes, which are high-pressure regions formed by a descending dry air mass, which due to its weight, force to descend. This dry air causes low relative humidity levels and prevents the formation of clouds and precipitation (Jury and Engert, 1999; Kousky and Alonso, 1981). This type of trajectory suggests the influence of ASAS in its formation.

Figure 5.14 shows the sets of trajectories estimated for the 15 largest daily precipitation events in the area over the UAS. It is important to highlight that the color scale used is associated with each moment of the trajectories' specific moisture content. A more bluish coloration represents the trajectories that present the highest moisture content and are generally below 2000 m of altitude, corroborating with Wallace and Hobbs (2006). The opposite occurs with the reddest trajectories, which have less moisture content and are generally at higher atmospheres levels.

Also, in Figure 5.14, it is possible to observe different storms generated by different atmospheric systems. However, all coming from the South Tropical Atlantic Ocean, corroborating the hypothesis that AMO, in its cold (negative) phase, influences precipitation generated in the region.

Concerning the systems, it can be seen that the period from 1977 and 1988 had a direct influence from the South Atlantic Convergence Zone, but in 1978 one can assume the predominance of systems from the Amazon with a strong contribution from systems in the Equatorial Atlantic Ocean. In 1982, it suggested the performance of High-Level Cyclonic Vortexes. In 1976, there is an indication of cold fronts' performance from the Southern or Indian Ocean. Therefore, it was not possible to correlate the high daily rainfall with a predominant atmospheric system.

As the rain pattern distribution shows a decreasing trend in the amount of precipitation in the last 45 years in the Urucuia Aquifer area it is expected a proportional reduction in groundwater recharge. This reduction is more important to the confined aquifer subsystem, but also may also affect the unconfined subsystems and must be considered when developing the management actions of the regional water resources.

5.5 Conclusions

The total annual rainfall da series over the UAS indicates a downward linear trend, confirmed by the Mann-Kendall test (p -value = 0.004).

Of the series of total annual rainfall evaluated by the Anderson-Darling (AD) adherence test, at the 5% level of significance, eight were accepted to be modeled by the log-normal distribution, with the position parameters (β) and shape (α) calculated by the L-moments method, namely: Ponte Serafim Montante (01145013), Fazenda Johá (01245014), Roda Velha (01245015), Fazenda Prainha (01346007), Cavalcante (01347000), Cajueiro (01445000), Alto Paraíso de Goiás (01447000) and Cabeceiras (01546005).

Analyzing the average of all annual rainfall, it is observed that there is a significant difference between the series' first 16 years and the series' last 16 years, which leads to considering that external climatic phenomena may influence mainly the volume and intensity of the precipitation.

Correlating the monthly and annual rainfall with the AMO index, the results were statistically significant, revealing the potential teleconnection of the sea surface temperature of the North Atlantic Ocean with precipitation over the Urucuia Aquifer System.

The comparison between the monthly rainfall series that occurred when the AMO index was positive with the series of rainfall that occurred when this index was

negative showed a significant difference between the average precipitation in the dipole's negative and positive phases.

Therefore, in the positive phase of the dipole, there is the inhibition of cloud formation, a decrease in precipitation, and, consequently, causing dry periods because the waters of the North Tropical Atlantic become warmer and the waters of the Equatorial Atlantic and Tropical South become colder. On the other hand, in the negative phase of the dipole, the North Tropical Atlantic waters become colder and the South Tropical Atlantic warmer waters, generating an increase in upward movements over these regions, intensifying the formation of clouds and increasing rainfall.

No correlation was found between the Pacific Decadal Oscillation (PDO), Southern Oscillation Index (SOI), El Niño South Oscillation Multivariate Index (ENSO), and precipitation over UAS.

With the evaluation of the precipitation trajectories, it was observed that the specific humidity of the air and the pressure decrease exponentially with the altitude, but that the specific humidity in the period from 1973 to 1990 (negative AMO) was 26% higher than the specific humidity in the period of 1990 to 2006 (positive AMO), which shows a greater amount of water vapor in the atmosphere during the negative AMO period compared to the positive AMO period.

The trajectory data show no variation between the values of specific air humidity and atmospheric pressure with the increase or decrease in the total precipitation, as the results were not statistically significant.

The trajectories along the negative AMO phase, on average, occurred at greater latitudes and closer to the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), showing that this atmospheric system can influence the precipitation during the negative phase of the AMO.

In contrast, in the positive AMO phase, on average, the latitudes of the trajectories were lower and closer to the Capricorn Tropic, suggesting that the rainfall received little influence from ITCZ in the phase of positive AMO, and perhaps more influence from the South Atlantic Subtropical Anticyclone (SASA).

In the phase of positive AMO, it was observed that the trajectories had snail aspects around the initial coordinates, mainly at higher altitudes, which may suggest the presence of high-level cyclonic vortex, as these are closed cyclonic circulations in

the upper troposphere as shown by the atmospheric waves, whose intensity is higher in the upper troposphere and decreases towards the surface (Reboita *et al.*, 2010).

Different atmospheric systems generate the storms, but all coming from the South Tropical Atlantic Ocean, corroborating the hypothesis that AMO influences the precipitation in the region.

Concerning the systems, it is possible to identify a possible performance of the South Atlantic Convergence Zone, of systems coming from the Amazon with a strong contribution from equatorial Atlantic Ocean systems, High-Level Cyclonic Vortexes, and cold fronts coming from the Antarctic or the Indian Ocean.

However, it was not possible to correlate the high daily rainfall with a predominant atmospheric system.

As the precipitation pattern shows a decrease trend in the last decades it is expected a reduction in the aquifer recharge and in the water availability in the near future.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Geological Service of Brazil for the financial and technical support for this research.

6 IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NAS VAZÕES DOS RIOS EFLUENTES DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO¹

6.1 Introdução

A região do oeste do estado da Bahia é uma área em franco desenvolvimento, experimentando acelerada expansão agrícola comercial que se iniciou há pelo menos 30 anos, a ponto de ser atualmente considerada um dos polos de agricultura mais importantes do país. O cenário inerente de alta demanda hídrica é acompanhado de modificações na cobertura vegetal, notadamente a supressão de extensas áreas de cerrado e de elevado risco de contaminação por fertilizantes e defensivos agrícolas, além da inevitável expansão de centros urbanos.

Este é um ponto importante de análise, pois as áreas densamente ocupadas ou em forte ritmo de desenvolvimento são especialmente sensíveis aos períodos hidrológicamente críticos, como secas prolongadas e estiagens, tendo em vista que as maiores demandas e os potenciais conflitos do uso decorrem das condições de escassez. Portanto, nessas regiões, é especialmente importante entender o comportamento hidrológico dos mananciais, predizendo suas reservas e disponibilidades, a fim de embasar políticas e medidas de gestão compartilhada, sempre na perspectiva dos potenciais cenários de mudanças naturais, sociais e econômicas.

Nessa região, toda a demanda de recursos hídricos, assim como os potenciais conflitos e impactos relacionados, incide sobre o extenso manancial representado pelo Sistema Aquífero Urucuia (SAU), um sistema basicamente vinculado às formações Posse e Serra das Araras, do Grupo Urucuia, que representa a cobertura fanerozoica do Cráton do São Francisco (GASPAR; CAMPOS, 2007). Todo o sistema tem importância fundamental na manutenção das vazões dos afluentes da margem esquerda do rio São Francisco – rios Urucuia, Corrente, Grande e Carinhonha –, bem como na alimentação de nascentes de tributários da margem direita do rio Tocantins, na borda ocidental da Serra Geral de Goiás (GASPAR, 2006).

¹ Os dados, os resultados de testes e os resultados parciais desta pesquisa estão disponíveis no Apêndice D (CD-ROM em anexo).

O Sistema Aquífero Urucuia é um reservatório de águas subterrâneas, situado entre as latitudes 9°25'38" e 16°15'00" e as longitudes 47°41'42" e 43°46'43", sob a unidade de relevo denominada Chapadão Ocidental da Bahia ou do São Francisco (IBGE, 2006), do lado baiano, e Serra Geral do Goiás, do lado goiano/tocantinense, com altitudes variando de 300 m a mais de 1000 m em relação ao nível do mar. Do ponto de vista geomorfológico, o desnível na região alcança até 500 m, com escarpas abruptas e com presença de colúvios, compondo solos constituídos essencialmente de areia quartzosa.

De acordo com o mapa geológico da CRPM (2004), 97,5% de sua área são formados pelo Grupo Urucuia, de origem eólica e fluvial, enquanto 2,5% são formados por depósitos aluvionares recentes.

Hidrogeologicamente, o SAU é um aquífero de natureza livre ou confinada, homogêneo, do tipo intergranular, de extensão regional, contínuo, que apresenta um eixo divisor longitudinal que separa o fluxo subterrâneo para o sentido oeste (Bacia Hidrográfica do Tocantins/Araguaia) e o sentido leste (Bacia Hidrográfica do São Francisco) (GASPAR; CAMPOS, 2007).

Os dados disponíveis admitem a proposição de quatro diferentes subsistemas no Sistema Aquífero Urucuia (GASPAR, 2006): aquífero livre regional, aquífero livre profundo, aquífero suspenso local e aquífero semiconfinado, com características hidráulicas e físicas contrastantes, incluindo espessura da zona vadosa, coeficiente de armazenamento, transmissividade e escoamento de base.

O aquífero livre regional é o subsistema que ocupa a maior área na bacia. Apresenta nível estático variável desde 4 até cerca de 50 m, sendo explotado por meio de poços tubulares de cerca de 100 m de profundidade para demandas domésticas. O fluxo de base desse subtipo de aquífero mantém a perenidade e a elevada vazão específica da rede de drenagem superficial, que, por sua vez, contribui para a regularização da vazão do rio São Francisco, principalmente na época de secas na bacia, que ocorrem de forma simultânea em toda a área do alto, médio e submédio curso da bacia.

A condição de artesianismo desse subsistema de aquífero é controlada por níveis silicificados em profundidade. Entretanto, é comum a presença de vários níveis silicificados no perfil em diferentes profundidades. Esses níveis funcionam, muitas vezes, como aquitardes, permitindo uma drenança vertical de diferentes camadas.

A maior parte dos poços tubulares de alta vazão bombeia água desse subsistema aquífero. O nível potenciométrico nesse subtipo de aquífero é bastante variável. Em um caso observado no município de Luís Eduardo Magalhães, a superfície potenciométrica de um poço com profundidade maior que 200 m é mais rasa que a dos demais poços da mesma bateria, com profundidade da ordem de 100 m.

Schuster et al. (2002) corroboram a presença desse tipo de aquífero, a partir de dados de testes de bombeamento, que apresentam valores de coeficiente de armazenamento iguais ou inferiores a 10^{-3} . Barbosa et al. (2014) afirmam que os testes de aquífero e levantamentos geofísicos elétricos revelam que o SAU meridional se comporta como um sistema aquífero-aquitarde-aquífero, representado pela Formação Serra das Araras, níveis silicificados fraturados e Formação Posse, respectivamente, nas bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado.

O contexto do aquífero livre profundo é vinculado ao extremo oeste da área de ocorrência do aquífero Urucuaia, distribuído a oeste do eixo divisor de fluxo regional. Os poços perfurados nesse aquífero apresentam níveis estáticos profundos – em sua maior parte, mais profundos que 100 m. O nível freático regional aumenta progressivamente para oeste em direção à divisa com os estados de Goiás e Tocantins. Seu escoamento de base alimenta as nascentes da Bacia Hidrográfica do Tocantins/Araguaia.

O aquífero suspenso local constitui um subtipo de aquífero desenvolvido em função da presença de níveis silicificados rasos e de extensão limitada. Esses níveis funcionam como um aquitarde, retardando a drenagem vertical da água, o que permite o acúmulo de água, provavelmente de forma temporária, acima da superfície potenciométrica regional, podendo, assim, ocorrer acima de outros subtipos dentro do sistema. Ele é responsável pela manutenção de lagoas rasas e amplas, além de terras úmidas, principalmente nas cabeceiras das principais drenagens no extremo oeste da bacia. Os níveis silicificados afloram nas bordas leste e oeste da chapada e são interceptados durante a perfuração de poços tubulares. O escoamento de base, proveniente desse último subsistema, é muito sensível ao bombeamento, de forma que os poços tubulares nunca deverão ter seção de filtro em sua porção rasa, sob o risco de afetarem instantaneamente as vazões em cabeceiras e até causar o secamento de lagoas e áreas úmidas. Esse subsistema é o mais sensível à exploração e ao uso intensivo dos solos para plantio irrigado, inclusive de sequeiro.

Os resultados da interpretação de perfis geofísicos e ensaios de bombeamento dos poços demonstram que o SAU apresenta diferentes comportamentos hidrogeológicos, em função da presença de níveis de arenitos silicificados, das variações dos parâmetros hidrodinâmicos das unidades aquíferas e do posicionamento geomorfológico e geográfico em sua área de abrangência. As características dos diferentes subtipos aquíferos são modificadas de acordo com a posição estratigráfica dos níveis de arenitos silicificados em relação às do nível freático regional.

Os diferentes comportamentos hidrogeológicos do SAU são diferenciados não apenas pela presença de níveis de arenitos silicificados e do posicionamento geomorfológico e geográfico em sua área de abrangência, mas pelas variações dos parâmetros hidrodinâmicos das unidades aquíferas (GASPAR; CAMPOS, 2007; BARBOSA et al., 2014, 2017). Ou seja, a presença de subtipos de aquíferos pode ser comprovada por variações hidrodinâmicas e litológicas do Grupo Urucua. Os parâmetros hidrodinâmicos, principalmente o coeficiente de armazenamento (S) e a transmissividade (T), são essenciais para modelar fluxos de água e solutos no subsolo, além de serem também importantes para estimar o potencial dos aquíferos e aperfeiçoar a gestão de recursos hídricos (GONÇALVES; LOHE; CAMPOS, 2015). Além disso, as variações dos valores de condutividade hidráulica da zona não saturada podem indicar a heterogeneidade dos aquíferos intergranulares, devido à diferença das características estruturais e texturais dos solos.

Apresenta-se, a seguir, a síntese de dados hidrodinâmicos segundo Gaspar e Campos (2007), de acordo com os quais o aquífero livre regional apresenta condutividade (K) em torno de 10^{-7} a 10^{-6} m/s, o aquífero livre profundo apresenta K em torno de 10^{-6} m/s, e o aquífero semiconfinado entre 10^{-5} a 10^{-4} m/s, ou seja, a condutividade é menor nos aquíferos livres (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Parâmetros hidrodinâmicos obtidos em poços do SAU.

| Parâmetro | K (m/s) | T (m ² /s) | S | Q/s (m ³ /h/m) |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Aquífero Livre regional | $2,4 \times 10^{-7}$ | $4,9 \times 10^{-5}$ | - | 0,46 |
| | $1,3 \times 10^{-6}$ | $2,7 \times 10^{-4}$ | - | 2,70 |
| Aquífero livre profundo | $3,9 \times 10^{-6}$ | $1,4 \times 10^{-3}$ | - | 13,1 |
| Aquífero confinado ou semiconfinado | $2,55 \times 10^{-5}$ | $8,91 \times 10^{-3}$ | $1,01 \times 10^{-4}$ | 13,1 |
| | $6,4 \times 10^{-5}$ | $2,5 \times 10^{-2}$ | $1,4 \times 10^{-4}$ | 12,35 |
| | $3,8 \times 10^{-5}$ | $1,9 \times 10^{-2}$ | $1,8 \times 10^{-4}$ | 15,18 |

Fonte: GASPAR; CAMPOS, 2007.

Gaspar, Campos e Cadamuro (2007), em trabalho sobre as condições de infiltração em solos na região de recarga do Sistema Aquífero Urucuia, mostraram evidências de grande homogeneidade dos solos na área, pois os valores de condutividade vertical (Kv) obtidos nas profundidades a partir de 0,5 até 2 m foram da ordem de 10^{-6} m/s, com diminuição progressiva da condutividade hidráulica com a profundidade testada e aumento de até 10% do conteúdo de argila, a partir da superfície até 200 cm de profundidade, o que apontou correlação entre o aumento do conteúdo de argila (em profundidade) e a diminuição do valor de Kv.

Contudo, o papel de depuração natural das águas de percolação vertical e de regularização das vazões/perenidade dos cursos d'água superficiais nos períodos de recessão das chuvas é função desempenhada com grande eficiência em Latossolos, mesmo quando situados sobre aquíferos fraturados desenvolvidos em rochas cristalinas e argilosas (GASPAR; CAMPOS; CADAMURO, 2007). De acordo com esses autores, as áreas de chapadas regionais recobertas por Latossolos são muito importantes para as condições de sustentabilidade dos aquíferos, uma vez que essas áreas contribuem para as funções de recarga e regularização, sendo relevantes tanto para a manutenção das vazões de drenagens superficiais quanto para controlar as reservas explotáveis dos aquíferos profundos.

Uma avaliação multitemporal da susceptibilidade erosiva na bacia do rio Urucuia (MG), por meio da equação universal de perda de solos, determinou a ocorrência de mudanças significativas na degradação e erosão do solo, quando comparados os mapas de erosão de 1987 e de 2007, em que o fator mais significativo foi o aumento das áreas agrícolas, pois é notável a forte influência dos fatores de uso e manejo (C) e de práticas conservacionistas (P) no mapa mais recente (MATA et al., 2007).

Três tipos de dutos foram encontrados no município de Barreiras, sobre o SAU, identificados e classificados com base na existência ou não de colapso do solo, além de sua associação com a presença ou não de voçoroca. A ocorrência de duto ou fratura comprovou que, na área estudada, o *piping* é um dos processos mais importantes na formação e evolução de voçorocas, pois o colapso do terreno gera o aparecimento de um canal superficial, causando o desenvolvimento de voçoroca e uma variedade de canais ramificados, com e sem colapso do teto (PEREIRA et al., 2016).

Passos, Rocha e Hadlich (2010), a partir da análise da evolução do uso do solo na região de Barreiras, utilizando imagens de satélite Landsat-5 (1984 e 2008) e imagens SRTM, processadas no programa Spring, mostraram que o agronegócio trouxe mudanças espaciais na área, com crescimento da área urbana e alterações na distribuição da vegetação, com aumento da área agrícola e redução da vegetação de cerrado. Segundo esses autores, entre 1984 e 2008 houve redução de 65% na área ocupada pelo cerrado, substituído, sobretudo, pela agricultura empresarial, e que a atividade agrícola também se expandiu nos vales, mas que a vegetação de cerrado permanece nos locais de difícil acesso, inclusive para a agricultura familiar, como nas bordas da chapada e nas vertentes mais íngremes.

Essa ocupação do oeste da Bahia se deu, inicialmente, pelos pioneiros nos processos de ocupação e formação territorial, que, até o início da década de 1980, era considerada uma área pouco povoada, com economia estagnada (GIORDANO, 1999). Entretanto, durante a década de 1970, programas de parceria agrícola entre o Brasil e o Japão foram iniciados para estudar a viabilidade de se desenvolver a agricultura no Brasil, devido à necessidade de o Brasil promover a agricultura no cerrado, local até então considerado impróprio para essa atividade, enquanto o Japão precisava sanar parte de seu problema de abastecimento causado pelo embargo provisório das exportações de grãos e farelos pelos Estados Unidos (a medida visava à garantia do abastecimento interno) (ROSS, 1996).

Esse modelo de expansão agrícola também considerou a topografia plana e os solos profundos e friáveis, que facilitam o uso intensivo de máquinas agrícolas, e o balanço hídrico positivo no período chuvoso, que permite a implantação da agricultura de sequeiro (MACARRINGUE et al., 2017).

Uma amostra típica desse modelo de expansão agrícola é a região sobre o SAU, que vem experimentando acelerada expansão agrícola, consistindo hoje em um dos polos de agricultura irrigada mais importantes do país. Essa região contribuiu com 69% da área total ocupada com lavouras temporárias da Bahia (2.287 mil ha), sendo 1.580 mil ha destinados ao cultivo da soja (IBGE, 2019b). Inclusive, esse grão é responsável pela ascendência do Brasil no mercado internacional de alimentos (THE ECONOMIST, 2010).

Contudo, essa expansão agrícola é associada à polêmica sobre a existência ou não de sobreexploração dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Vários estudos mostram que o Sistema Aquífero Urucuia é muito importante para a Região Hidrográfica do São Francisco e que seu fluxo de base contribui significativamente para a vazão do rio São Francisco, principalmente no período de estiagem. De acordo com Marques et al. (2020) e Pedrosa (2020), os conflitos no médio São Francisco ocorrem devido ao uso indiscriminado das águas (incluindo as águas subterrâneas provenientes do SAU) e o uso inadequado do solo com a irrigação.

Exemplos incluem os afluentes do rio Corrente, que são essenciais por serem a principal fonte de abastecimento de comunidades tradicionais do oeste baiano (ANA, 2017b), onde há vários casos de conflitos, pois o potencial do aquífero é alto (os poços podem fornecer até 500 m³/h) e a vazão do rio é capaz de atender à necessidade de uma cidade com 90 mil pessoas (150 litros/pessoa/dia), mas a conexão entre as águas superficiais e subterrâneas e o uso indiscriminado podem acarretar diminuição nessas vazões (MARQUES et al., 2020).

Esse tipo de discussão não é novo. Schuster et al. (2002) haviam afirmado que algumas bacias do oeste baiano estavam próximas de atingir seus limites máximos de vazões a serem outorgadas e que por isso os produtores da região estavam construindo poços profundos com grandes vazões (de até 500 m³/h), para suprir a demanda de água.

Nesse sentido, o Instituto de Gestão das Águas e Clima da Bahia (INGÁ) desenvolveu estudos, entre 2001 e 2002, para subsidiar o gerenciamento integrado dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e criar normativos para aplicação da outorga de uso da água, instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos (NASCIMENTO et al., 2003).

A conectividade entre águas subterrâneas e superficiais, na área de influência do Sistema Aquífero Urucuia, já havia sido comprovada (RODRIGUES, 2013), como também uma análise dos efeitos da extração de águas subterrâneas por poços mostrou que o armazenamento de água subterrânea, em longo prazo, diminui em 2 km³ (rebaixamento médio no aquífero de 0,8 m) sem interferências na direção de fluxo regional, e que o fluxo de base dos rios principais é reduzido em aproximadamente 6% após a extração de água subterrânea (OLIVEIRA et al., 2019).

Além disso, a profundidade da superfície potenciométrica do sistema aquífero não é constante, variando de menos de 20 m nas proximidades dos vales a mais de 180 m próximo ao limite físico da Serra Geral de Goiás (BARBOSA et al., 2014).

Existe consenso entre as autoridades dos estados da Bahia e Minas Gerais sobre a necessidade de gerenciamento integrado dos recursos hídricos, especificamente no que se refere aos conflitos hídricos no rio São Francisco, devido à existência de muitos poços outorgados, e que o monitoramento e a fiscalização são decisivos para se conhecer a quantidade de água extraída do SAU (PEDROSA, 2020).

Marques et al. (2020), em seus estudos, avaliaram possíveis impactos do aumento do uso da água para agricultura irrigada e da diminuição da precipitação sobre os aquíferos, com base nos dados de monitoramento da vazão dos rios e na variação nos níveis de lençol freático, visando a observar uma tendência de longo prazo em função dos efeitos da variação climática e do aumento da demanda. Os resultados indicaram redução das chuvas nas cabeceiras da bacia do Alto Grande, devido a secas cíclicas, e aumento na exploração de águas superficiais e subterrâneas, vinculado ao agronegócio, que ocasionaram rebaixamento de até 6,63 m, indicando necessidade de ações de melhor gestão para proporcionar o uso sustentável dos recursos hídricos em longo prazo.

Por sua vez, Fontes (2020) mostrou uma tendência em função dos efeitos da variação climática. Uma análise da variação do nível de água subterrânea na bacia do rio Grande mostrou uma tendência crescente de queda associada ao baixo índice pluviométrico dos últimos anos, sendo as elevações sazonais resultantes da recarga.

Vários autores mostraram que houve quedas significativas da precipitação e da vazão ao longo dos anos hidrológicos. Em termos médios, a recarga média anual para a bacia do rio das Fêmeas (1977-2007) foi igual a 256,53 mm/ano (ALBUQUERQUE, 2009; ALBUQUERQUE; CHAVES, 2011), valor este bem semelhante ao encontrado entre janeiro de 1984 e dezembro de 1995, quando a recarga média estimada foi de 257,02 mm/ano, ou seja, igual a 20% da precipitação média (PIMENTEL et al., 2000). O balanço hidrogeológico para o período de 1982 a 2002 na zona vadosa da área da bacia hidrogeológica do SAU, região de Correntina (BA), resultou em uma recarga de 278,98 mm/ano, isto é, 24% da precipitação média (GASPAR, 2006).

Usando o método dos elementos finitos empregado no algoritmo computacional FEFLOW, diversos autores realizaram uma simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas nas bacias dos rios Grande (27.358 km²) e Corrente (22.695 km²), na Bahia, e encontraram uma recarga de 209,62 mm/ano (15.711.448 m³/dia), correspondente à recarga por precipitação na bacia do rio Grande (GONÇALVES, 2013), e de 224.47 mm/ano (13.957.500 m³/dia) para a recarga por precipitação na bacia do rio Corrente (ENGELBRECHT, 2014).

No estudo apresentado por ANA (2017b), em que a determinação da vazão de base foi encontrada pelo uso do programa HYSEP (SLOTO; CROUSE, 1996), determinou-se que a contribuição total estimada para as regiões hidrográficas circundantes é de aproximadamente 991,55 m³/s, assim distribuídos: a bacia do São Francisco recebe uma contribuição estimada de cerca de 730 m³/s; a do rio Tocantins, 215 m³/s; e a do Parnaíba, 45 m³/s. Neste estudo, foram utilizadas 19 estações fluviométricas, consideradas como principais.

Os mesmos valores foram encontrados por Silva e Chang (2018), ao analisarem a estimativa do fluxo regional que, segundo esses autores, é responsável pela descarga de água na forma de escoamento de base para os rios São Francisco (731 m³/s), Tocantins (215 m³/s) e Parnaíba (45 m³/s), que se move no sentido de oeste para leste, acompanhando o sentido do escoamento superficial.

Em 2019, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM publicou um relatório de caracterização hidrológica do Aquífero Urucuia (CPRM, 2019), que apresenta a identificação de regiões hidrológicamente homogêneas, além de quantificar os volumes do escoamento de base e equivalentes às vazões com permanência de 90 e 95% para 34 estações fluviométricas, que são utilizadas como referência para concessão de outorgas pelo estado e pela União. Esse estudo vem corroborar com o projeto “Estudos hidrogeológicos no sistema hídrico Urucuia”, que objetiva adensar a Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), bem como o desenvolvimento de estudos integrados na área desse importante aquífero (CPRM, 2012).

Fontes (2020), em seus estudos, mostra que o nível de água subterrânea apresenta tendências crescentes de queda, associadas ao baixo índice pluviométrico dos últimos anos e que os níveis dos poços monitorados apresentaram tendências proporcionais de variações das recargas devido às precipitações.

Na bacia do rio Grande, o balanço hidrológico independente, usando medições *in situ* e taxas de evapotranspiração estimadas, com valores mensais do armazenamento de água terrestre (TWS), obtidas por um conjunto de três modelos da missão Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), mostra que o esgotamento do armazenamento de água do SAU se dá apenas pelos impactos antropogênicos e não pela variação climática natural, e que já existe um balanço negativo igual ao estresse hídrico, com uma taxa de depleção de TWS de $6,5 \pm 2,6$ mm/ano (GONÇALVES et al., 2020).

Seguindo na linha, um estudo nas cabeceiras da bacia do Alto Grande indicou que a redução da precipitação entre 1990 a 2018, ocasionada por secas cíclicas e aumento do uso das águas superficiais e subterrâneas pelo agronegócio, gerou um rebaixamento de até 6,63 m no nível do lençol freático, o que ressalta a necessidade de melhor gestão do uso sustentável dos recursos hídricos (MARQUES et al., 2020).

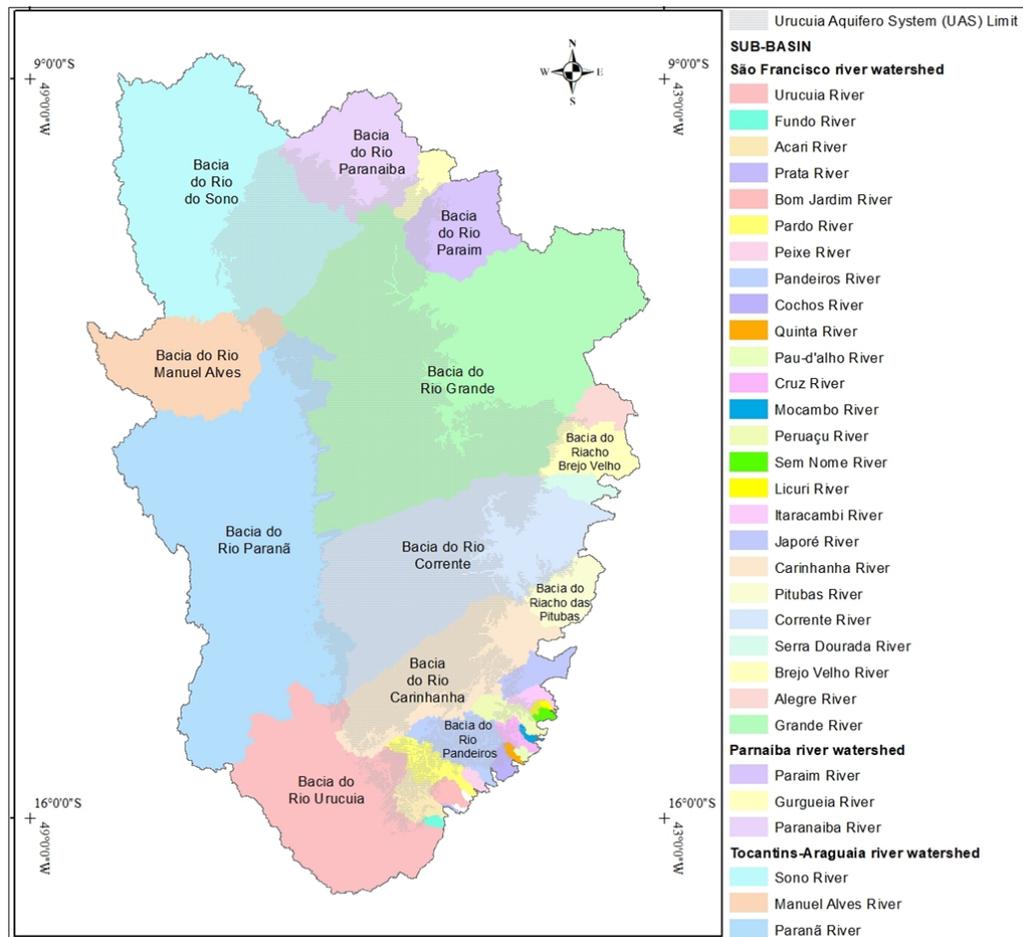
Apesar de ser uma área muito estudada, existem muitos pontos a serem esclarecidos, sendo um deles a determinação, com maior precisão, de qual a disponibilidade hídrica de algumas bacias hidrográficas inseridas no SAU, além de entender se o crescimento da agricultura está causando impactos na vazão de base. Nesse sentido, este trabalho vem caracterizar e comparar os escoamentos de base de alguns rios mantidos pelo SAU, determinando os respectivos fatores de controle: subtipos de aquíferos, condições de recarga e análise da influência ou não do uso agrícola na geração do escoamento de base.

6.2 Materiais e Métodos

Na região do SAU foram delimitadas 33 sub-bacias hidrográficas, cujos rios e afluentes recebem contribuições desse aquífero em suas vazões: 27 pertencem à Região Hidrográfica do São Francisco, três à Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia e três à Região Hidrográfica do Parnaíba. Essa divisão é decorrente da Resolução n. 32, de 15 de outubro de 2003, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que dividiu o Brasil em 12 regiões hidrográficas e que considera “região hidrográfica o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos” (BRASIL, 2003).

Entretanto, como as áreas das sub-bacias transcendem a área do SAU (Figura 6.1), este trabalho focará no estudo das sub-bacias pertencentes à Região Hidrográfica do São Francisco.

Figura 6.1 – Mapa das bacias de drenagem dos rios cujas nascentes estão na área de ocorrência do sistema aquífero Urucuia.



Fonte: Elaborado por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

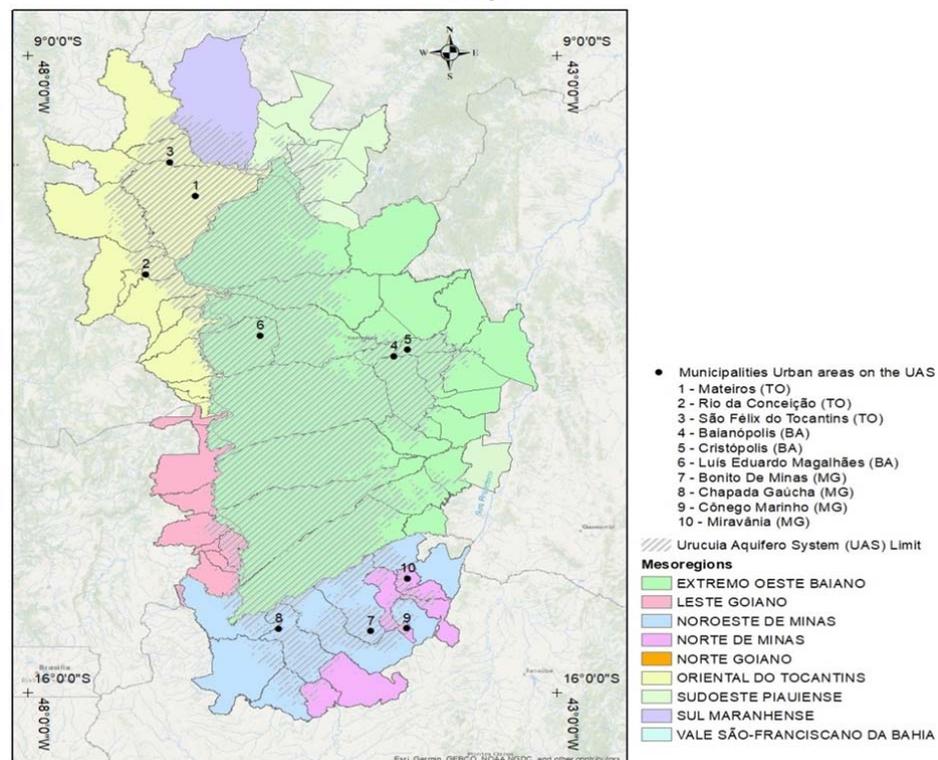
A maior sub-bacia é a do rio Grande, localizada na Região Hidrográfica do São Francisco, e onde as nascentes de dois grandes rios estão inseridas na área do SAU: as nascentes dos rios Grande e Preto, seu principal afluente. Nela estão inseridos os municípios de Barreiras, Luís Eduardo Magalhães e São Desidério, uns dos primeiros a expandirem a área agrícola e que hoje destinam entre 44 a 58% para o uso desse setor. Nessa região hidrográfica está localizada a bacia do rio Corrente, a segunda maior sub-bacia, com área igual à metade da área da sub-bacia do rio Grande. A expansão agrícola nos municípios dessa região só ocorreu a partir de 1993 e hoje o uso agrícola compreende apenas 22% da área dessa sub-bacia.

Essas variações demonstram a importância de considerar, na avaliação da área, o uso do solo, além das divisões em sub-bacias. Por isso, em cada sub-bacia foram avaliadas informações multitemporais do uso do solo, incluindo os usos da água na irrigação, pecuária, abastecimento público e industrial; os dados de chuva; os dados hidrológicos (vazão dos rios); dados dos poços e determinação da vazão efluente do SAU (vazão de base).

6.2.1 Dados multitemporais de uso do solo

Como a área do SAU está inserida no perímetro de seis estados brasileiros, foram considerados todos os municípios que estão inseridos, total ou parcialmente, em sua área, para realizar uma análise cronológica populacional e econômica da região, visando a analisar como ocorreu a expansão da agricultura e da pecuária na região. As duas informações, em formato *shapefile*, foram correlacionadas para avaliar as áreas urbanas e a porcentagem da área rural em que estão inseridas na área do estudo (Figura 6.2).

Figura 6.2 – Estados e municípios inseridos total ou parcialmente na área de ocorrência do SAU.



Fonte: Elaborado por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Para avaliar a produtividade agrícola anual dos municípios inseridos no SAU, foram utilizados dados disponibilizados no Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA (IBGE, 2019b), referente à área plantada em hectares das lavouras temporárias e permanentes, no período de 1990 a 2015. Com essas informações, foi possível definir se o início e a ascensão do agronegócio ocorreram ou não nesse período, além de contribuir na avaliação da forma como ocorreu a expansão desse setor na região.

Ao final, foram correlacionadas as informações dos municípios no IBGE com as informações de uso agrícola do solo por município, para analisar a consistência das duas informações, que serviram também para definir: i) a taxa de crescimento anual na área ocupada pelo agronegócio; ii) a porcentagem das áreas ocupadas pelo agronegócio nos municípios e estados inseridos total ou parcialmente na área do SAU.

Buscando avaliar numericamente a porcentagem de área que está sendo usada na agricultura e pecuária, em relação à área total do SAU, procedeu-se à comparação dos mapas de uso do solo da região, onde foram utilizados os *shapes* do Projeto MapBiomas (MAPBIOMAS, 2020), que “é uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélites. A descrição completa do projeto encontra-se em <http://mapbiomas.org>". Os arquivos *shapefile*, no período de 1985 a 2018, foram delimitados e analisados com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento, por meio do *software* ArcGis, que usa o Sistema de Informações Geográficas (SIG) e que permite a confecção de mapas e a correlação das informações existentes com o objetivo de gerar nova informação.

6.2.2 Dados de chuva

Considerando como ano seco aquele com precipitação anual abaixo da média histórica, e como chuvoso aquele com precipitação anual acima da referida média, foi analisada a variabilidade da espacialização do volume precipitado nos anos secos e chuvosos. Também foram espacializadas as precipitações em todos os meses do ano, observando-se a existência de variabilidade entre os meses chuvosos e secos.

Em seguida, as séries das precipitações médias mensais foram classificadas

para o período de 1973 a 2006, o que permitiu classificar os meses em secos e chuvosos, de acordo com a metodologia do Rainfall Anomaly Index (RAI)/Índice de Anomalia de Chuva (IAC), proposta por Rooy (1965), que caracteriza a ocorrência de períodos secos e chuvosos e sua intensidade.

Tal metodologia é empregada por diversos pesquisadores, tais como Kraus (1977); Souza, Albuquerque e Lopes (2000); Freitas (1998); Araújo, Moraes Neto e Sousa (2009); Cruz et al. (2013); Moraes (2014); Alves e Araújo (2015); Dutta et al. (2015); Noronha, Hora e Silva (2016); Hänsel, Schucknecht e Matschullat (2016); Cerqueira, Santos e Aquino (2018); Lima et al. (2019) e Surendran et al. (2019).

Os períodos seco e chuvoso na região foram definidos com base em um hietograma médio mensal, determinado a partir das séries de dados mensais de 94 estações pluviométricas instaladas sobre e no entorno da região de ocorrência do Sistema Aquífero Urucuia e analisadas neste trabalho.

Para comparação com os dados da rede de monitoramento dos poços (instalada em 2011), analisaram-se os dados das precipitações médias mensais no período de 2011 a 2018.

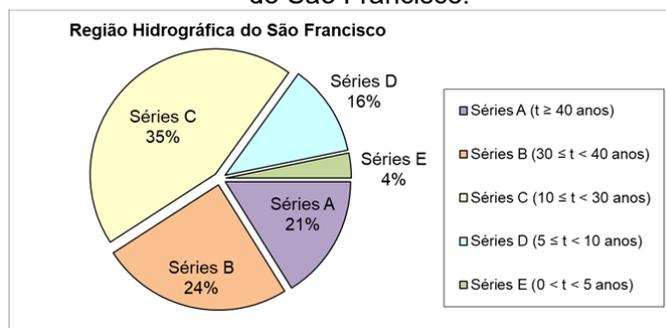
6.2.3 Dados de vazão

Nas 27 sub-bacias delimitadas e pertencentes à Região Hidrográfica do São Francisco estão inseridas 68 estações fluviométricas com dados de vazão, assim distribuídas: 29 estações no rio Grande (sub-bacia 46), 16 no rio Corrente (sub-bacia 45), 12 no rio Urucuia (sub-bacia 43), 10 no rio Carinhanha (sub-bacia 45), 3 no rio Pandeiros (sub-bacia 44) e 1 no rio Japoré (sub-bacia 44).

Essas estações foram classificadas de acordo com o tamanho da série de dados disponíveis em: **A** para séries de dados com 40 anos ou mais; **B** para séries de dados com 30 até 39 anos; **C** para séries de dados com 10 até 29 anos; e **D** para séries de dados com 5 até 9 anos. Séries de dados menores que cinco anos não foram pré-selecionadas para o estudo por serem curtas para caracterizar um comportamento hidrológico de longo tempo. A seguir, apresentam-se as estatísticas da disponibilidade de dados fluviométricos das estações pré-selecionadas, indicando que 21% das estações são classificadas como **A**, 24% como **B**, 35% na classe **C**, 16% enquadradas como **D** e 4% foram classificadas como **E**. As estações da classe **E** não foram selecionadas e as classificadas como **D** foram separadas para serem utilizadas nas etapas de validação das simulações por terem séries de dados curtas

(Figura 6.3). Já as séries maiores de 10 anos de dados foram pré-selecionadas para serem utilizadas nas análises de caracterização da bacia (Tabela 6.2).

Figura 6.3 – Estatística da disponibilidade de dados fluviométricos da Região Hidrográfica do São Francisco.



Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Tabela 6.2 – Informações das estações pré-selecionadas por afluente da região hidrográfica do São Francisco.

| Afluente (Rio) | Quantidade de Estações Excluídas (Classe E) | Quantidade de Estações Pré-Selecionadas (Classes A, B, C) | Quantidade de Estações Seleccionada (Classe D) |
|----------------|---|---|--|
| Grande | 2 | 19 | 8 |
| Corrente | - | 15 | 1 |
| Carinhanha | - | 9 | 1 |
| Japoré | - | 1 | - |
| Urucuia | 1 | 10 | 1 |
| Pandeiros | 0 | 3 | 0 |

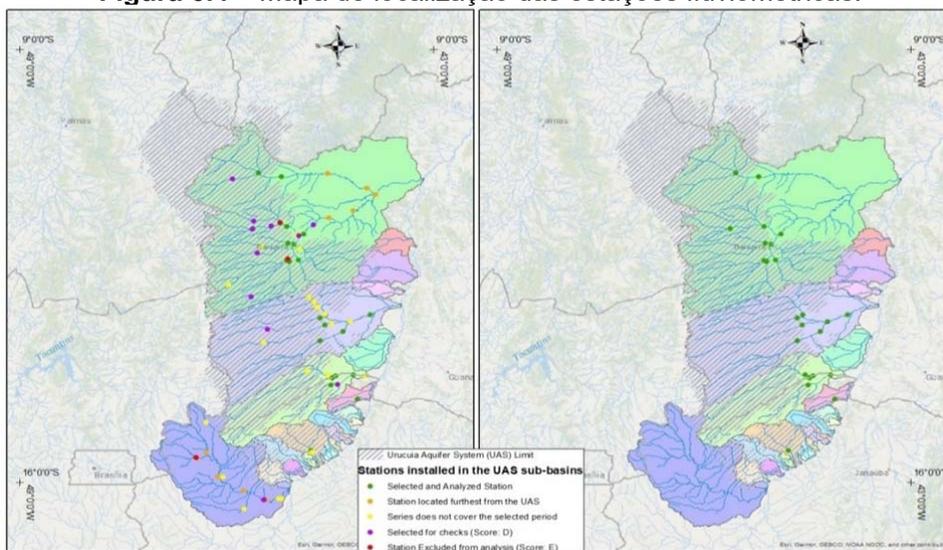
Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Com base na análise prévia de viabilidade, foram pré-selecionadas as séries históricas das estações pertencentes às bacias hidrográficas ou áreas de drenagem dos rios: Grande (sub-bacia 46), Corrente (sub-bacia 45), Urucuia (sub-bacia 43), Carinhanha (sub-bacia 45), Pandeiros (sub-bacia 44) e Japoré (sub-bacia 44).

Após análise dos dados de chuva, foi definido o período de setembro de 1973 a agosto de 2006 para análise do balanço hídrico. Considerando, também, a localização da estação (sobre o SAU ou em seu exutório), foram separadas 26 estações cujas séries podem ser utilizadas nas análises (Figura 6.4; Tabela 6.3).

Para comparação e análise em conjunto com mapas de uso do solo, utilizaram-se os dados de vazões mensais, no período de 1985 a 2018. Devido à instalação da RIMAS ter ocorrido apenas em 2011, foram analisados os dados das vazões médias mensais referentes ao período de 2011 a 2018, para comparação com os dados da rede de monitoramento dos poços.

Figura 6.4 – Mapa de localização das estações fluviométricas.



Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Tabela 6.3 – Vazão média de longo termo, mínima e máxima e o volume escoado médio das estações selecionadas.

| Sub-Bacia (Rio) | Estação | Nome | Área (km ²) | Vazão Média (m ³ /s) | Vazão Máxima (m ³ /s) | Vazão Mínima (m ³ /s) |
|-----------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Urucua | 43980002 | Barra do Escudo | 24.600 | 241,3 | 1.917,4 | 9,69 |
| Pandeiros | 44250000 | Usina Pandeiros Montante | 3.230 | 23,4 | 147,0 | 8,1 |
| Japoré | 44540000 | Fazenda Bom Retiro | 624 | 2,0 | 39,2 | 0,4 |
| Carinhanha | 45131000 | São Gonçalo | 6.020 | 68,0 | 235,1 | 34,2 |
| | 45170001 | Fazenda Porto Alegre | 5.850 | 61,8 | 204,9 | 38,9 |
| | 45210000 | Lagoa das Pedras | 12.600 | 131,7 | 425,5 | 71,1 |
| | 45220000 | Capitânea | 2.380 | 12,4 | 76,7 | 2,9 |
| | 45260000 | Juvenília | 16.300 | 145,1 | 698,7 | 73,2 |
| Corrente | 45590000 | Correntina | 3.900 | 32,6 | 109,7 | 21,1 |
| | 45740001 | Mocambo | 7.950 | 41,7 | 200,6 | 20,4 |
| | 45770000 | Arrojado | 5.540 | 58,8 | 218,5 | 38,5 |
| | 45840000 | Gatos | 7.130 | 80,7 | 238,3 | 50,1 |
| | 45880000 | Colônia do Formoso | 9.550 | 83,2 | 312,1 | 51,3 |
| | 45910001 | Santa Maria da Vitória | 29.600 | 212,1 | 823,8 | 122,5 |
| Grande | 45960001 | Porto Novo | 31.000 | 216,5 | 816,2 | 125,7 |
| | 46415000 | Sítio Grande | 4.950 | 33,0 | 104,0 | 4,9 |
| | 46455000 | Derocal | 6.350 | 50,4 | 173,2 | 25,9 |
| | 46490000 | Fazenda Coqueiro | 4.470 | 6,6 | 68,8 | 1,1 |
| | 46543000 | Fazenda Redenção | 5.380 | 50,2 | 138,6 | 21,8 |
| | 46550000 | Barreiras | 24.400 | 89,0 | 335,0 | 24,6 |
| | 46570000 | Ponte Serafim Montante | 2.710 | 14,4 | 54,0 | 3,9 |
| | 46590000 | Nova Montante | 7.480 | 51,6 | 168,8 | 31,4 |
| | 46610000 | São Sebastião | 33.100 | 191,3 | 652,0 | 106,8 |
| | 46770000 | Fazenda Bom Jardim* | 6.930 | 35,1 | 66,6 | 23,2 |
| 46790000 | Formosa do Rio Preto* | 14.300 | 101,3 | 308,0 | 65,2 | |
| | 46902000 | Boqueirão | 65.900 | 265,0 | 477 | 184 |

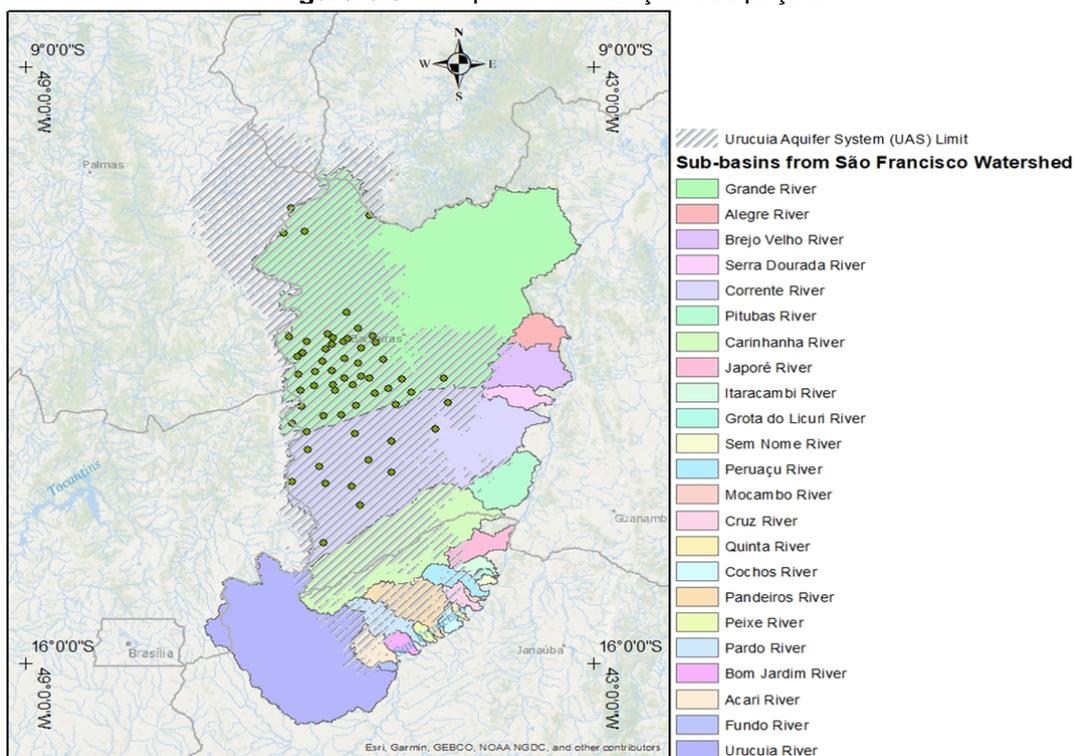
Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Nota: As estações com asterisco (*) estão situadas na sub-bacia do rio Preto, afluente do rio Grande.

6.2.4 Dados de poços (RIMAS)

Os dados dos poços na região foram obtidos a partir da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) (CPRM, 2012), criada pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, com o propósito de registrar as variações de nível d'água por meio de instrumentos que permitem o registro automático, instalados em poços de observação, com coleta dos dados armazenados, realização de processos de consistência e tratamento, além da posterior disponibilização para consulta e *download*. Neste trabalho, foi analisada a série de dados de 59 poços, no período de 2011 a 2018 (Figura 6.5).

Figura 6.5 – Mapa de localização dos poços.



Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

6.2.5 Vazão de base

Durante a ausência de precipitação e considerando que não existe escoamento superficial nos períodos de secas e estiagens, a vazão nos rios é mantida pelo escoamento subterrâneo, visto que a liberação natural das águas armazenadas nas redes de canais a montante do trecho considerado, bem como a evaporação das águas armazenadas em aquíferos, são componentes que podem

ser desprezadas nessas situações hidrológicamente críticas (REIS JÚNIOR, 2012).

De acordo com Hewlett e Nutter (1969 apud GUERRA; CUNHA, 2001), o escoamento subterrâneo, também conhecido como vazão de base, consiste em uma componente da vazão de um rio qualquer, que se mantém durante os períodos secos e é alimentado exclusivamente pela descarga da água subterrânea. Ou seja, é o escoamento gerado pelas águas subterrâneas existente nos aquíferos, cuja recarga vem através da parcela de água infiltrada e que percola até a zona saturada do aquífero. Os aquíferos, que são formações geológicas com conexão hidráulica com o corpo hídrico superficial, permitem que a água seja descarregada na rede de drenagem. Entretanto, essa descarga depende do tipo, da geometria e das características hidráulicas do aquífero, além da quantidade de água armazenada e suas propriedades de transmissão de água (PAIVA; PAIVA, 2003).

A vazão de base também pode ser definida como a descarga gerada após o instante final da chuva, somada ao intervalo temporal correspondente ao tempo de concentração da bacia, cuja forma no hidrograma é definida por uma curva exponencial decrescente. Para sua determinação, comumente são utilizados métodos gráficos, baseados na análise dos hidrogramas, que têm base física, mas também contemplam componentes tais como os métodos de traçado de linha apresentados por Custódio e Llamas (1983, apud MIRANDA, 2012).

Há, ainda, métodos de análise da frequência que usam filtros, como o Filtro Digital Recursivo de Eckhardt (COLLISCHONN; FAN, 2012; DORA, 2013; ECKHARDT, 2008), como também os métodos de análise de recessão do escoamento, como os propostos por Boussinesq (1904 apud VERHOEST, 2000), Horton (1945 apud TROCH et al., 2013), Meyboom (1961 apud ARNOLD et al., 1995) e Rorabaugh (1964 apud ARNOLD; ALLEN, 1999). Em estimativas mais complexas, utilizam-se isótopos ou análises químicas para identificar tendências de fluxos das águas provenientes dos aquíferos.

Neste trabalho, foi proposta uma adaptação na metodologia do filtro digital recursivo desenvolvido por Lyne e Hollick (1979), com base em análise e processamento de sinais (LYNN, 1973), utilizado por diversos autores (ARNOLD et al., 1995; ARNOLD; ALLEN, 1999; SZILAGYI, 2003, 2004).

Essa metodologia é aplicada, principalmente, ao Soil and Water Assessment Tool (SWAT), um modelo de simulação do ciclo hidrológico em escala de bacia hidrográfica, usado para simular a qualidade e a quantidade de águas superficiais e

subterrâneas, além de prever o impacto ambiental do uso da terra, práticas de gestão da terra e até mudanças climáticas. Criado no início da década de 1990, vem sendo atualizado e amplamente utilizado por diversos pesquisadores (NATHAN; MCMAHON, 1990; WHITE; CHAUBEY, 2005; NEITSCH et al., 2011; BAZILIAN et al., 2011; LUO et al., 2012, KALCIC; CHAUBEY; FRANKENBERGER, 2015; FRANCO; BONUMÁ, 2017).

O método do filtro digital recursivo consiste em aplicar procedimentos matemáticos a dados digitais. Nesse caso, foi aplicada a média móvel recursiva, de $N = 2$, aos dados de escoamento superficial, ou seja, ao escoamento rápido que é gerado pela parte da precipitação que não infiltra no solo nem evapora. Entretanto, Lyne e Hollick (1979) consideraram que se propagava no tempo uma porcentagem da vazão superficial, que seria igual ao parâmetro β . Em seguida, escreveram a diferença da vazão superficial em função da vazão total do rio, considerando a referida porcentagem propagada para a vazão total. Assim, a equação do filtro recursivo digital é:

$$q_t = \beta \cdot q_{t-1} + \frac{(1+\beta)}{2} \cdot (Q_t - Q_{t-1}) \quad (\text{I}) \text{ e}$$

$$Qb_t = Q_t - q_t \quad (\text{II})$$

Onde: Qb_t é a vazão de base no instante t , q_{t-1} é a vazão superficial no instante anterior ($t - 1$), Q_t é a vazão do rio no instante t , Q_{t-1} é a vazão do rio no instante anterior ($t - 1$) e β é a constante do filtro, que deve ter o valor compreendido entre 0,75 e 0,9 (LYNE; HOLLICK, 1979). Esse filtro digital, análogo à filtragem de sinais de alta frequência, não tem verdadeira base física, mas é objetivo e reproduzível. O mesmo princípio, aplicado no programa BaseFlow (ARNOLD et al., 1995), foi considerado para a determinação da vazão de base proveniente do SAU, onde o valor de β é fixo, igual a 0,925 (NATHAN; MCMAHON, 1990; ARNOLD et al., 1995), e o filtro passa três vezes pelos dados de vazão (para frente, para trás e para frente).

Contudo, a vazão de base diária (QB), em m^3/s , foi definida como sendo igual à média entre as vazões de base, no mesmo instante t , mas obtidas na primeira e segunda passagem do filtro. Isso com base no estudo de Arnold e Allen (1999), que concluíram que a fração do rendimento da água contribuída pelo fluxo de base, em geral, deve situar-se entre os valores encontrados na primeira e segunda passagem.

$$QB_t = \frac{Qb_{t(1^{\circ}passagem)} + Qb_{t(2^{\circ}passagem)}}{2} \quad (\text{III})$$

Assim, definiu-se a vazão de base diária de cada estação analisada, localizada nos rios efluentes do SAU, para o período setembro de 1973 a agosto de 2018, a partir das séries de dados de vazão das 26 estações fluviométricas selecionadas e analisadas.

A constante de recessão da vazão de base foi determinada para todas as séries de vazões, com base na curva de recessão principal de cada estação, a qual foi definida a partir do conjunto das curvas de recessão do fluxo de base por ano hidrológico. Neste estudo, o Número de recessões de fluxo de base individuais usadas para calcular a curva de Recessão Pincipal (NRP), em média, foi igual a 31 recessões. Esta constante avalia, em função da recarga, a resposta da vazão subterrânea e informa se a resposta às recargas nas vazões é lenta (0,1 e 0,3) ou se a área analisada é sensível a recarga (0,9 e 1,0) (Salles, 2012).

6.3 Resultados e Análises de Dados

6.3.1 Discussões por parâmetro analítico

6.3.1.1 Uso e ocupação do solo

De acordo com a análise dos dados, 69 municípios estão inseridos, total ou parcialmente, na área do SAU, mas apenas 10 têm sua sede inserida sobre o SAU (Tabela 6.4). Observa-se que o estado com maior quantidade de municípios inseridos no SAU é a Bahia, seguido por Tocantins e Minas Gerais. Goiás tem a menor área inserida e nenhuma sede municipal dentro da área.

Tabela 6.4 – Total de municípios inseridos, total ou parcialmente, na área de ocorrência do SAU.

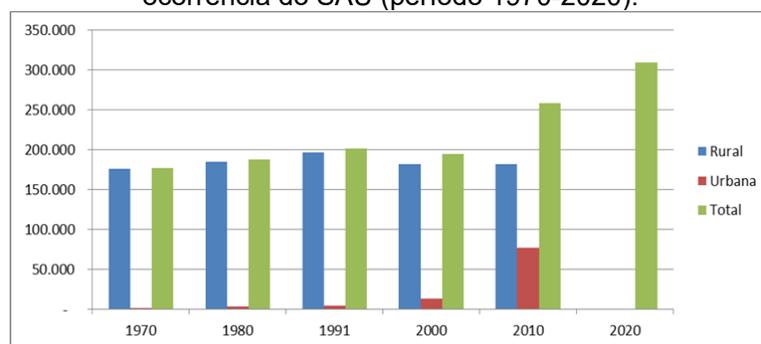
| Estado | Nº de Municípios Inseridos | Nº de Sedes Municipais Inseridas | Área Inserida no SAU (km ²) |
|--------------|----------------------------|----------------------------------|---|
| Bahia | 26 | 3 | 82.425 |
| Goiás | 8 | 0 | 1.779 |
| Maranhão | 1 | 0 | 2.708 |
| Minas Gerais | 14 | 4 | 12.495 |
| Piauí | 6 | 0 | 3.377 |
| Tocantins | 14 | 3 | 18.875 |
| Total | 69 | 10 | 121.659 |

Fonte: Elaborado por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Em relação à população residente, observa-se que esta tem aumentado progressivamente, quando se comparam os dados do período de 1970 a 2020 (Figura 6.6). Ressalta-se que os dados de 1970 a 2010 foram extraídos do “Censo demográfico: séries temporais” (IBGE, 2012a), enquanto aqueles referentes ao ano de 2020 foram obtidos em “Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2020” (IBGE, 2020).

A população rural tem se mantido constante desde o ano de 2000, enquanto a urbana aumenta, constantemente, desde 1980, o que demonstra que a população dessa região tem optado por morar na zona urbana (dos próprios municípios ou vizinhos). Entretanto, entre os anos de 2000 e 2010, ocorreu grande aumento da população urbana na região, principalmente devido à emancipação do distrito de Luís Eduardo Magalhães, pertencente até então ao município de Barreiras, criando uma área urbana de aproximadamente 37 km² sobre o SAU. Também se observou crescimento em 2020, devido, principalmente, ao aumento populacional do município de Luís Eduardo Magalhães, que passou de 60.105 habitantes (2010) para 90.162 habitantes (2020), de acordo com o “Censo demográfico: tabela 200” (IBGE, 2012b).

Figura 6.6 – Série histórica da população residente nos municípios inseridos na área de ocorrência do SAU (período 1970-2020).



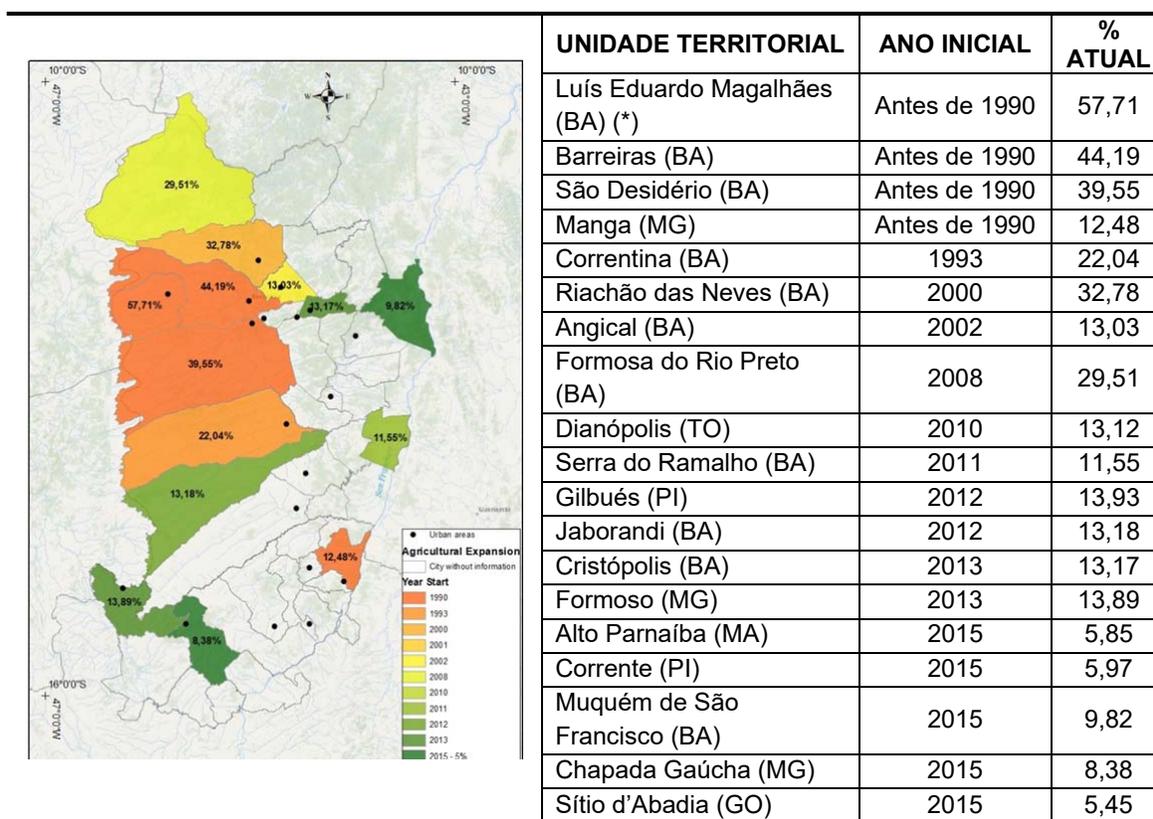
Fonte: IBGE, 2012b, 2020.

Indicam-se, a seguir (Figura 6.7), o ano em que se iniciou o uso agrícola do solo e a porcentagem atual, por município, obtidos por meio da série histórica de 1990-2015 (IBGE, 2017), o que mostra que, em alguns municípios, a atividade agrícola teve início antes de 1990, como em Barreiras, Luís Eduardo Magalhães e São Desidério (BA). Por outro lado, como a porcentagem é relativamente pequena em Manga (MG), não é possível afirmar que tal atividade se iniciou antes ou após

1990. Porém, observou-se que alguns municípios iniciaram a produção agrícola depois do ano 2000, mas já contam com porcentagem maior da área ocupada com o plantio. O município de Luís Eduardo Magalhães aparece com duas datas, porque, até a sua criação, em 2001, ele era parte do município de Barreiras, que teve sua agropecuária iniciada em 1990.

Ao espacializar essas informações, comprova-se que a expansão agrícola, na região de distribuição do SAU, começou pelo centro da região do oeste baiano, expandindo, inicialmente, no sentido centro-leste, direcionando-se depois no sentido sul, e, após o ano 2000, no sentido norte (Figura 6.7).

Figura 6.7 – Expansão agropecuária na região de distribuição do SAU.

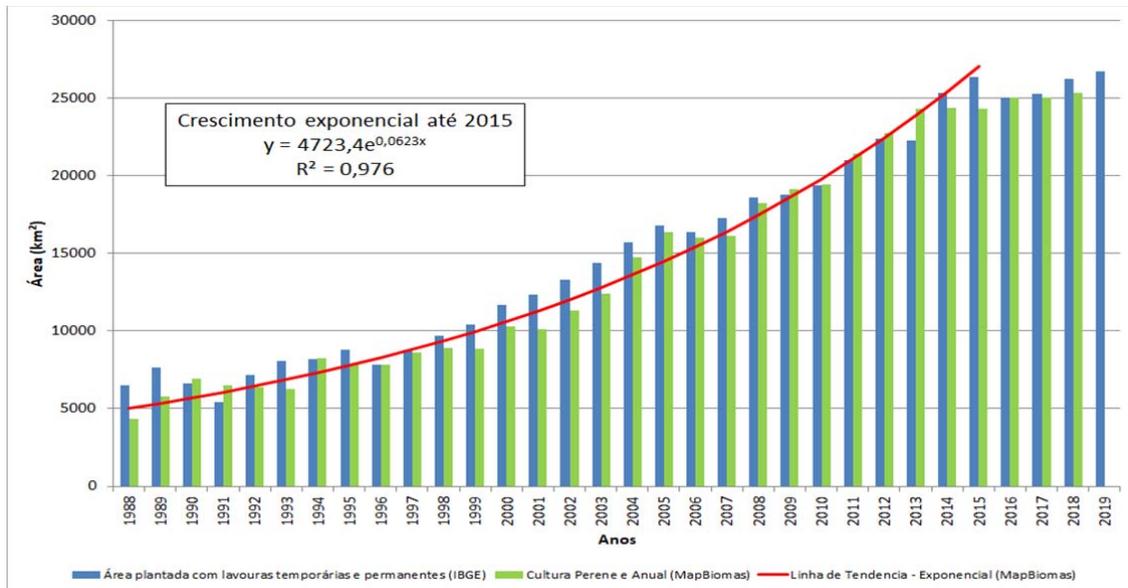


Fonte: IBGE, 2017.

Nota: (*) O município de Luís Eduardo Magalhães foi um dos primeiros a ser utilizado na agricultura. Entretanto, ele só consta nas tabelas do IBGE/SIDRA a partir de 2001, porque a sua emancipação ocorreu em 2000. Antes disso, a área pertencia ao município de Barreiras (que teve sua agropecuária iniciada em 1990).

O crescimento da área ocupada pela agricultura tem aumentado exponencialmente nos últimos anos, com taxa de crescimento anual igual a 9% (Figura 6.8), corroborando com resultados obtidos com a análise dos dados do IBGE (capítulo 3).

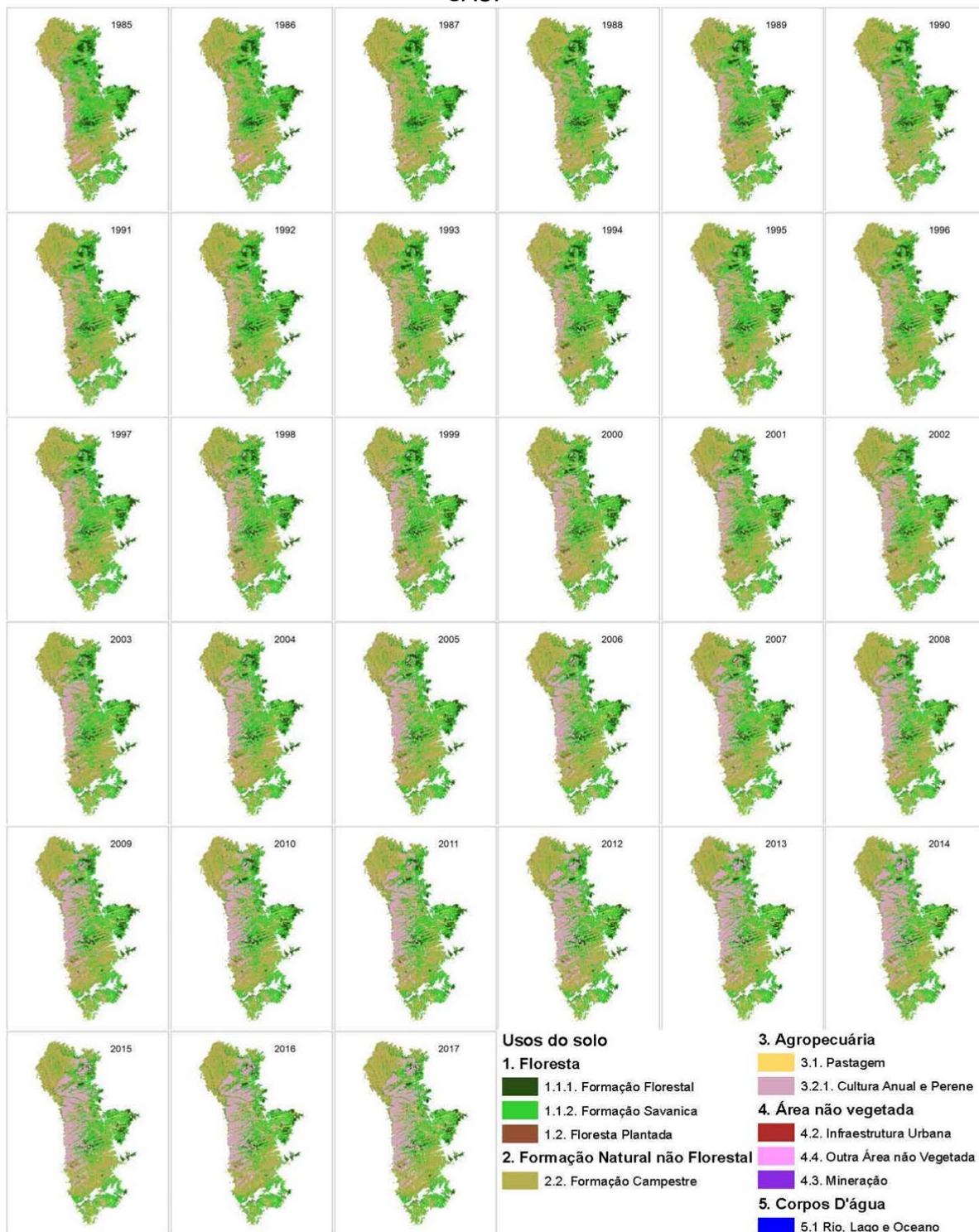
Figura 6.8 – Distribuição do crescimento da área ocupada (km²) pela agricultura na região de ocorrência do SAU.



Fonte: Elaborado por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Os mapas de uso e ocupação do solo analisados foram adaptados do Projeto MapBiomas (2020) e compreenderam o período de 1985 a 2018 (Figura 6.9). Como estão disponibilizados em formato *raster*, possibilitaram a interpretação dos dados.

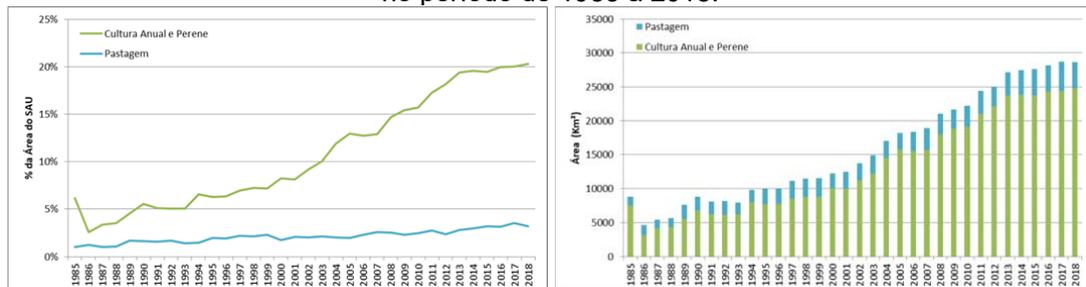
Figura 6.9 – Mapas comparativos de uso e ocupação do solo na região de ocorrência do SAU.



Fonte: Adaptado de MAPBIOMAS, 2020.

Observa-se uma taxa de 10% anual de aumento progressivo da expansão agropecuária na região, sendo 5% de crescimento das áreas usadas para culturas anuais e perenes e 5% para áreas de pastagem (Figura 6.10). Entretanto, a diferença do tamanho da área ocupada com esses usos, segundo os dados de 2018, mostra que a pastagem ocupava 3,2% da área (3.886 km²) e as culturas anuais e perenes, 20,3% da área total do SAU, equivalentes a 24.786 km². Ou seja, a área ocupada com as culturas perenes cresceu de 7.514 km² para 24.786 km² em 34 anos – crescimento de 508 km²/ano –, enquanto a área ocupada com a pastagem cresceu de 1.251 km² para 3.886 km² no mesmo período – crescimento de 77,5 km²/ano.

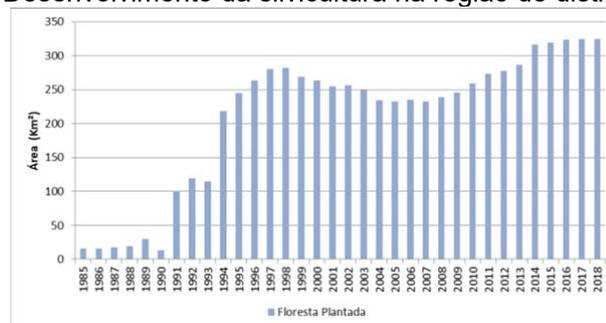
Figura 6.10 – Expansão agropecuária na região, definida a partir dos mapas de uso do solo no período de 1985 a 2018.



Fonte: Elaborado por Myrla, S.B. Vieira, 2020.

Durante a análise, registrou-se o desenvolvimento da silvicultura na região, que apresentou um aumento na área de floresta plantada a partir de 1991 (Figura 6.11): de 19 km² passou para 100 km² no referido ano e vem crescendo a cada ano, chegando a 325 km² em 2018.

Figura 6.11 – Desenvolvimento da silvicultura na região de distribuição do SAU.

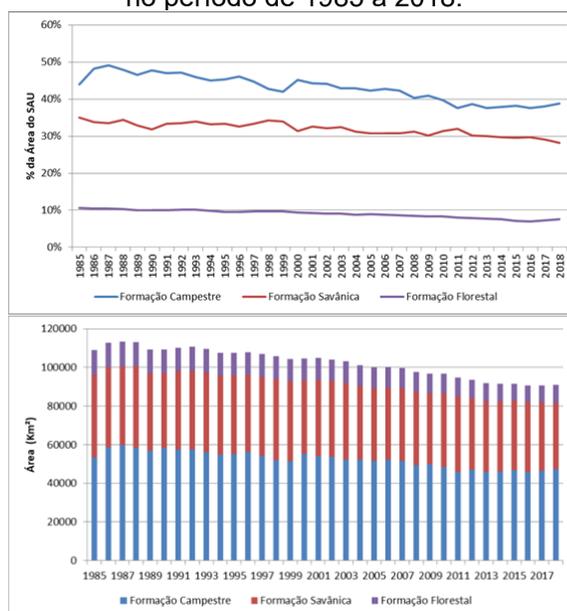


Fonte: Elaborado por Myrla, S.B. Vieira, 2020.

Com relação às áreas preservadas com formação campestre, florestal e savânica, suas dimensões estão diminuindo a uma taxa decrescente, em média, de 1% ao ano. Porém, como essas áreas ocupam a maior parte da região, esse valor corresponde ao desmatamento de 537 km² por ano.

No período de 34 anos, a área de formação campestre diminuiu de 53.548 km² para 47.384 km²; já a área de Savana diminuiu de 42.655 km² para 34.323 km²; enquanto a área de floresta, tipo Cerrado, hoje compreende uma área de 9.163 km², ou seja, 3.755 km² a menos que em 1985 (Figura 6.12). Salienta-se que 74% da área sobre o SAU se encontram preservados nas formas de formação campestre, florestal e savânica (principalmente, em seu setor centro-leste).

Figura 6.12 – Desmatamento na região definido a partir dos mapas de uso do solo no período de 1985 a 2018.



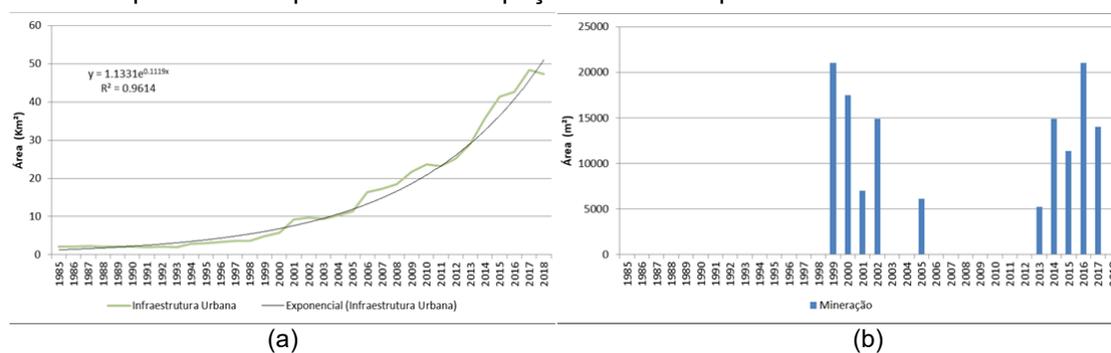
Fonte: Elaborado por Myrla, S.B. Vieira, 2020.

As áreas não vegetadas sobre o SAU diminuíram de 4.012 km² em 1985 para 1.985 km² em 2018, devido ao fato de, hoje, tais áreas apresentarem outros usos. Por exemplo, 28,5% estão sendo utilizados na agropecuária; 62,9% se regeneraram, dentre os quais 56,9% aparecem como formação campestre, 5,2% como formação savânica e 0,8% como formação florestal, além de 1,3% que aparecem como floresta plantada. Portanto, apenas 8,3% das áreas não vegetadas em 1985 (288 km²), hoje, aparecem com as mesmas características. Observa-se, ainda, que, em 2018, foram contabilizadas novas áreas mapeadas como áreas não vegetadas na região, que representariam 1.697 km².

Na análise, observou-se um aumento exponencial na área urbana (Figura 6.13a), corroborando com o descrito sobre o aumento da população urbana na área, como apontam os dados do SIDRA (IBGE, 2012b).

Ressalta-se que a mineração vem aparecendo na área do SAU de forma intermitente, a partir de 1999, no município de Taguatinga (TO), próximo à coordenada (12°17'6"S/46°22'59"W), ocupando uma área de até 2,1 ha (Figura 6.13b).

Figura 6.13 – Evolução da infraestrutura urbana (a) e da mineração (b) na região definida a partir dos mapas de uso e ocupação do solo no período de 1985 a 2018.



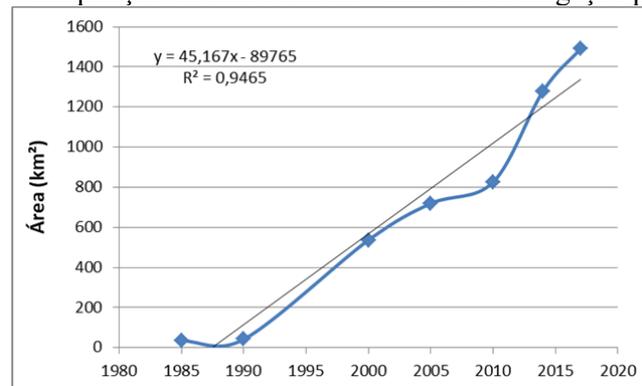
Fonte: Elaborado por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Ao final, se comparados os dados da série histórica 1990 a 2015 do SIDRA (IBGE, 2012b), com aqueles obtidos nos mapas de uso e ocupação do solo do período 1985 a 2018 (MAPBIOMAS, 2020), na escala 1:100.000, observa-se que há correspondência entre os valores das áreas contabilizadas para agricultura (IBGE, op. cit.) com os valores da classe de uso denominada “cultura perene e anual” (MAPBIOMAS, op. cit.); porém, os dados das áreas contabilizadas para agricultura são relativamente maiores, o que se credita à existência de outras áreas que também têm uso agrícola, mas que, provavelmente, não foram contabilizadas como área agrícola, como, por exemplo, “Floresta Plantada”.

6.3.1.2 Irrigação

A partir dos dados disponibilizados pelo “Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil” (ANA; EMBRAPA, 2019), determinou-se o crescimento da área irrigada na região do SAU entre 1985 e 2017, observando-se que a área de pivô aumentou linearmente na região (Figura 6.14), principalmente após 2010, chegando a ocupar 1.492 km² em 2017; contudo, esse valor representa apenas 6,1% da área usada na agricultura com culturas perenes e anuais (MAPBIOMAS, op. cit.).

Figura 6.14 – Ampliação da área com uso vinculado à irrigação por pivô central.



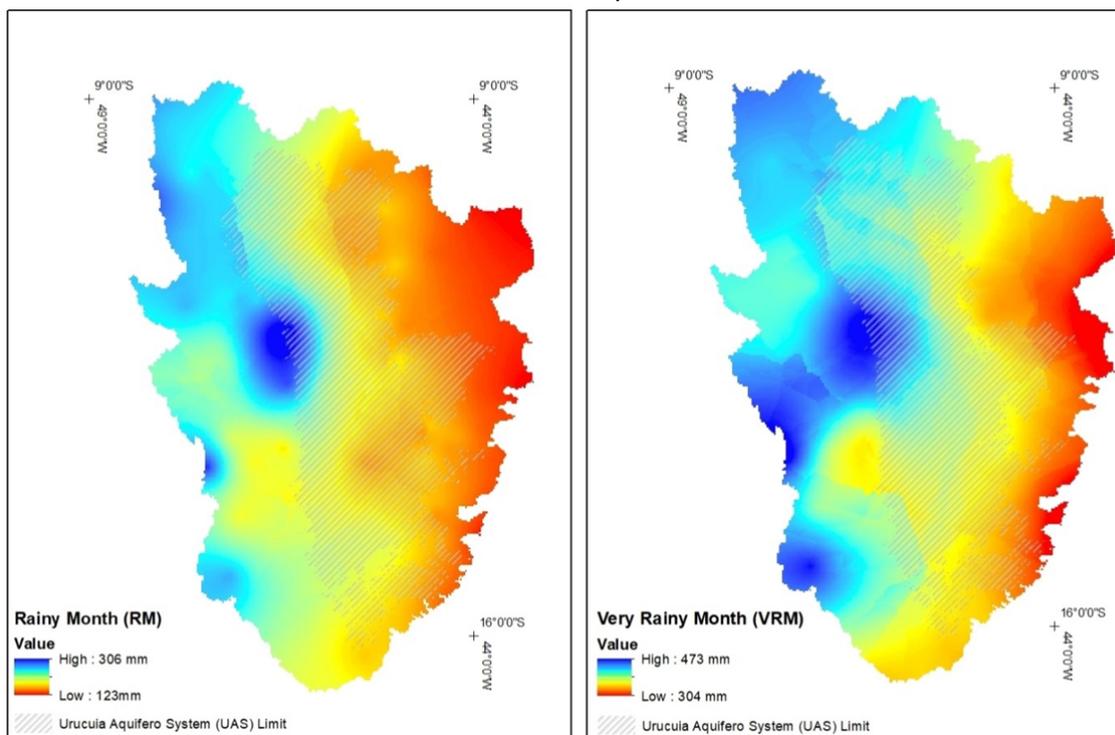
Fonte: Elaborado por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Como a demanda de água para irrigação da soja varia com valores de K_c de 0,22 para o estágio inicial, 1,5 para o intermediário e 0,39 para o final (SILVA et al., 2019), e considerando uma evapotranspiração real de 196 mm/mês e eficiência de 75%, seria necessária uma vazão de 173 m³/s para irrigar a área de 1.492 km², ou seja, uma média mensal de 300 mm.

6.3.1.3 Precipitação

O resultado da espacialização das chuvas não mostrou diferença entre os anos secos ou chuvosos na região sobre e no entorno do SAU (Figura 6.15). Após avaliação da espacialização das precipitações em todos os meses do ano, concluiu-se que, no período mais seco do ano (entre os meses de maio e setembro), não há variação na espacialização da chuva na região, ou seja, ela é quase uniforme sobre e no entorno da área do SAU. Entretanto, no período mais úmido do ano, entre os meses de outubro e abril, observa-se que a região oeste apresenta volume maior de precipitação, principalmente na região no entorno do município de Ponte Alta do Bom Jesus.

Figura 6.15 – Espacialização das precipitações médias mensais dos meses chuvosos e muito chuvosos, de acordo com a classificação do RAI, na região de ocorrência e de influência do sistema aquífero Urucua.



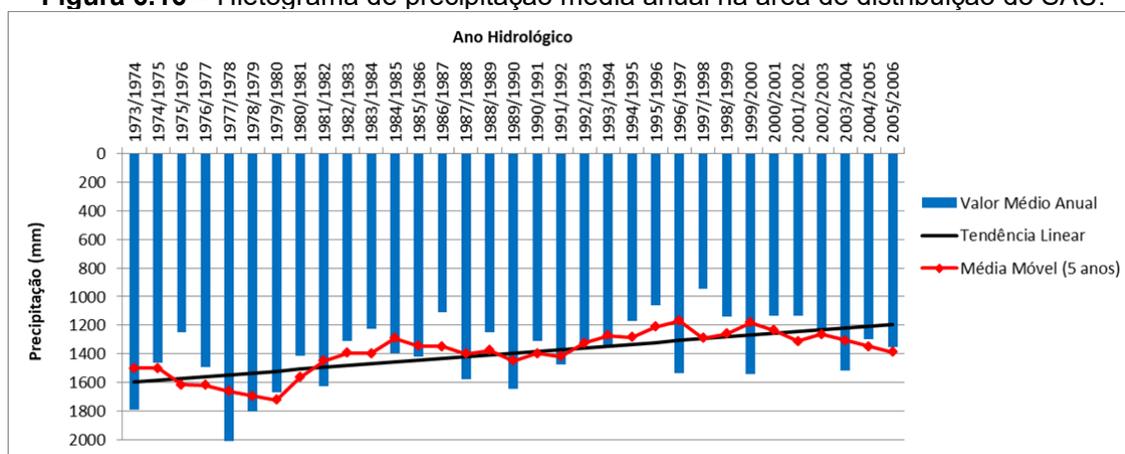
Fonte: Elaborado por Myrla S.B. Vieira, 2020.

A classificação pela metodologia do Índice de Anomalia de Chuva (IAC) permitiu definir que precipitações mensais entre 33,6 a 335 mm são normais na região e definem se os meses são secos (S) ou chuvosos (C) em relação à média. Porém, precipitações mensais iguais ou menores que 33,6 mm definem o mês como muito seco (MS), enquanto precipitações mensais entre 336 e 570 mm classificam o mês como muito chuvoso (MC); se forem iguais ou maiores que 570 mm, definem o mês como extremamente chuvoso (EC). Tem-se, assim, a seguinte classificação: 150 meses como Muito Seco (MS), 80 meses como Seco (S), 154 meses como Chuvoso (C), 11 meses como Muito Chuvoso (MC) e um mês como Extremamente Chuvoso (EC). Como a variação ocorre nos meses chuvosos, as precipitações dos meses considerados chuvosos, muito chuvosos e extremamente chuvosos foram espacializadas, confirmando-se a concentração em torno da Estação Ponte Alta do Bom Jesus.

As séries de dados das precipitações totais anuais de cada estação sobre o Sistema Aquífero Urucua, no período de 33 anos, indicaram tendência linear decrescente, representado pelo histograma da série de precipitação total anual

(Figura 6.16), comprovando o já apresentado por outros autores (GONÇALVES; ENGELBRECHT; CHANG, 2016, 2018; FONTES, 2020; MARQUES et al., 2020), ou seja, o valor pluviométrico dos últimos anos mostrou uma tendência decrescente significativa. Entretanto, o estudo usando um conjunto de três modelos da missão Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), no período de 2002 a 2014, não indicou qualquer declínio significativo na precipitação (GONÇALVES et al., 2020), diferentemente do demonstrado pela análise do hietograma (Figura 6.16), mas que pode ser justificado pelo uso de períodos distintos nos estudos.

Figura 6.16 – Hietograma de precipitação média anual na área de distribuição do SAU.



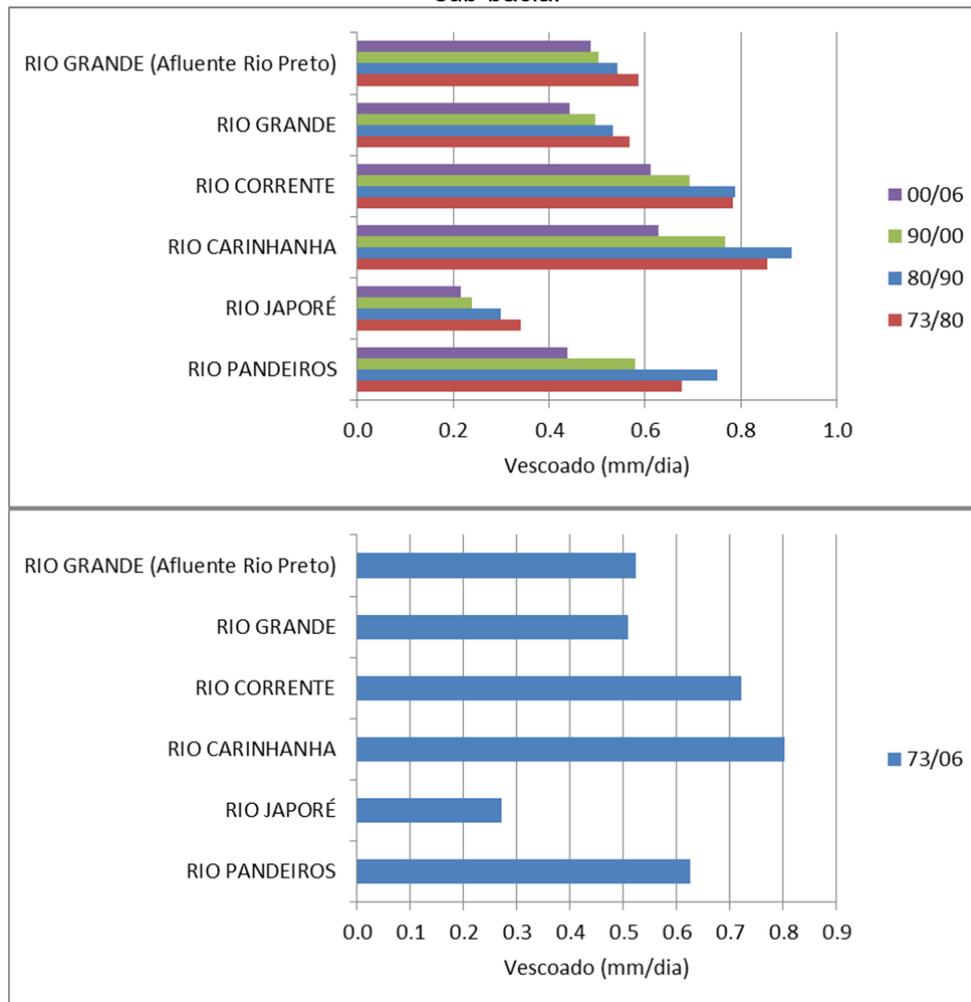
Fonte: Elaborado por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

6.3.1.4 Vazão total e vazão de base

Como as estações têm áreas diferentes, utilizou-se a métrica do deflúvio ou volume escoado (mm/dia) para comparação. Observou-se, assim, um valor médio de 0,6 mm/dia para as estações instaladas nos afluentes do rio São Francisco, para o período analisado, com valor máximo igual a 1 mm/dia e mínimo igual a 0,2 mm/dia, sendo que os menores estão nas áreas mais ao norte do SAU.

Visando a entender se a diferença entre o deflúvio ou volume de escoamento das estações sofreu alteração ao longo do período analisado (setembro/1973-agosto/2006 – 33 anos), determinou-se o deflúvio para cada estação e, em seguida, calculou-se a média por sub-bacia, o que permitiu observar que o deflúvio está diminuindo em toda a região. Entretanto, o deflúvio após o ano 2000 diminuiu, em média, 24% nas sub-bacias do rio São Francisco, chegando a 37% em algumas áreas (Figura 6.17).

Figura 6.17 – Variação do deflúvio ou volume escoado (mm/dia) ao longo das décadas por sub-bacia.

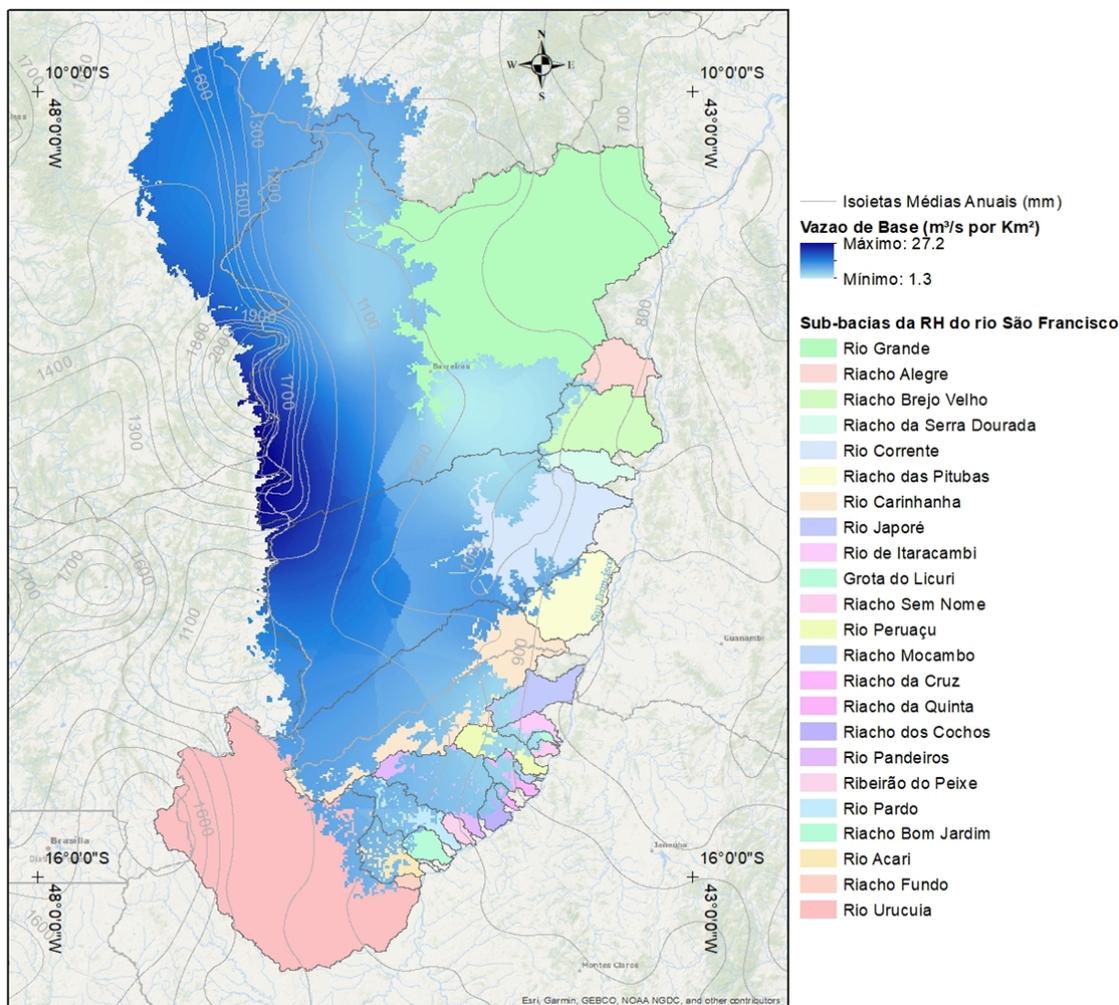


Fonte: Elaborado por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Em relação à vazão de base, a metodologia do filtro digital recursivo, adaptado de Lyne e Hollick (1979), foi utilizada para se calcular os valores diários por estação, com os quais se determinaram os valores de vazão de base médios, mínimos e máximos representativos de cada área de drenagem, além de possibilitar o cálculo da vazão de base por período.

Os valores médios da vazão de base mostraram a mesma tendência da vazão total, sendo os maiores valores das vazões de base provenientes do SAU encontrados nos afluentes do rio Tocantins (Figura 6.18).

Figura 6.18 – Mapa da espacialização da vazão de base liberada pelo SAU.



Fonte: Elaborado por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Nesta análise, determinou-se, também, que as vazões de base contribuem, em média, com 88,4% da vazão do rio; entretanto, esse valor não é uniforme em todas as sub-bacias. Nas sub-bacias do rio São Francisco, essa dependência é maior, em torno de 90%, mas nas sub-bacias mais ao sul (Pandeiros e Japoré), esse valor decresce para 80%, justamente nas sub-bacias em que ocorre a maior intermitência desse sistema aquífero. Porém, nas demais sub-bacias que ocupam maior área sobre o SAU, essa dependência do aquífero é quase integral: em média, a vazão de base é responsável por 91,5% das vazões dos rios, sendo que os menores valores estão nas áreas mais ao norte do SAU, semelhantemente ao observado na série de vazão total do rio.

A constante de recessão definida para cada série da vazão de base, a partir da curva de recessão principal, avalia a resposta do fluxo subterrâneo e informa se, nas vazões, a resposta à recarga é lenta (0,1 e 0,3) ou se a área analisada é sensível à recarga (0,9 e 1,0) (SALLES, 2012).

No caso do SAU, todas as constantes de recessão da vazão de base identificadas foram, no máximo, iguais a 0,047, o que demonstra que a resposta à recarga é muito lenta na área do SAU; além disso, a recessão da vazão de base demanda, em média, 184 dias para diminuir em cada ciclo (Tabela 6.5).

Tabela 6.5 – Fração da vazão contribuída pela vazão de base do SAU nos três passos do filtro digital recursivo.

| Estação | Fração Passo 1 | Fração Passo 2 | Fração Passo 3 | Constante de Recessão (α) | Tempo de Recessão (Dias) |
|----------|----------------|----------------|----------------|------------------------------------|--------------------------|
| 43980002 | 0,75 | 0,61 | 0,53 | 0,047 | 49 |
| 44250000 | 0,87 | 0,81 | 0,77 | 0,018 | 129 |
| 44540000 | 0,81 | 0,72 | 0,67 | 0,035 | 65 |
| 45131000 | 0,91 | 0,86 | 0,83 | 0,014 | 164 |
| 45170001 | 0,94 | 0,91 | 0,89 | 0,009 | 244 |
| 45210000 | 0,93 | 0,89 | 0,86 | 0,014 | 167 |
| 45220000 | 0,9 | 0,84 | 0,8 | 0,021 | 109 |
| 45260000 | 0,93 | 0,88 | 0,86 | 0,015 | 156 |
| 45590000 | 0,95 | 0,92 | 0,91 | 0,008 | 307 |
| 45740001 | 0,93 | 0,89 | 0,86 | 0,016 | 144 |
| 45770000 | 0,95 | 0,92 | 0,9 | 0,009 | 247 |
| 45840000 | 0,96 | 0,93 | 0,91 | 0,007 | 331 |
| 45880000 | 0,95 | 0,92 | 0,9 | 0,011 | 212 |
| 45910001 | 0,94 | 0,91 | 0,89 | 0,011 | 206 |
| 45960001 | 0,94 | 0,9 | 0,88 | 0,014 | 166 |
| 46415000 | 0,95 | 0,91 | 0,88 | 0,013 | 177 |
| 46455000 | 0,95 | 0,92 | 0,9 | 0,010 | 241 |
| 46490000 | 0,89 | 0,82 | 0,77 | 0,022 | 105 |
| 46543000 | 0,93 | 0,9 | 0,87 | 0,017 | 132 |
| 46550000 | 0,94 | 0,9 | 0,87 | 0,012 | 188 |
| 46570000 | 0,9 | 0,84 | 0,8 | 0,019 | 120 |
| 46590000 | 0,94 | 0,91 | 0,89 | 0,010 | 243 |
| 46610000 | 0,95 | 0,91 | 0,89 | 0,012 | 191 |
| 46770000 | 0,95 | 0,92 | 0,9 | 0,010 | 242 |
| 46790000 | 0,93 | 0,9 | 0,87 | 0,012 | 188 |
| 46902000 | 0,96 | 0,92 | 0,9 | 0,005 | 430 |

Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020

6.3.2 Discussões por sub-bacia

6.3.2.1 Sub-bacia do rio Urucuia

O rio Urucuia é o primeiro afluente, com descarga do SAU, a contribuir com a vazão do rio São Francisco; entretanto, apesar de ter uma área de 25.315 km², apenas 7,97% estão sobre o SAU (2.019 km²). Esse rio é responsável pela vazão média de longo termo (QMLT) igual a 239,8 m³/s, dos quais 66% correspondem à vazão de base (QB) proveniente do Sistema Aquífero Urucuia (159,4 m³/s). Nessa sub-bacia, a estação fluviométrica instalada no rio Urucuia mais próxima da calha do rio São Francisco é a Barra do Escudo (código: 43980002), cuja vazão média anual vem diminuindo à taxa de -0,6% ao ano (Tabela 6.6). Nessa bacia, o uso do solo no SAU passou de 143,9 km² para 276,7 km² para pastagem, que é o uso preponderante, pois as culturas, perenes e anuais, e florestas plantadas ocupam apenas 11,1 km² da área. Nessa sub-bacia, a área com pivô central vem sendo observada desde o ano 2000 e não aumentou nesse período, variando de 1,4 para 2,3 km² em 2014, mas reduzindo para 1,9 km² em 2017, reforçando que o uso do solo principal é a pecuária.

Tabela 6.6 – Dados médios da estação analisada no rio Urucuia.

| Estação | Nome | Área (km ²) | Volume Escoado (mm/dia) | Vazão Média (m ³ /s) | Vazão Mínima (m ³ /s) | Vazão Máxima (m ³ /s) | Vazão de Base (m ³ /s) | | |
|----------|-----------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------|---------|
| | | | | | | | Média | Mínima | Máxima |
| 43980002 | Barra do Escudo | 24600 | 0.8 | 241,3 | 9,69 | 1.917,4 | 159,4 | 9,7 | 1.607,7 |

Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

6.3.2.2 Sub-bacias dos rios Pandeiros e Japoré

Entre as fozes dos rios Urucuia e Carinhanha, foram analisadas duas pequenas sub-bacias, situadas na margem esquerda do rio São Francisco, mas que recebem contribuição do SAU. Nelas estão instaladas as estações fluviométricas Usina Pandeiros (código: 44250000) e Fazenda Bom Retiro (código: 44540000), que apresentaram diminuição na vazão média anual de -0,57% e -0,27%, respectivamente, apesar de 91% da área estarem preservados como formação campestre (26%), florestal (8%) e savânica (58%) (MAPBIOMAS, 2020). Nos 9% restantes, a maioria é ocupada com pastagem (em torno de 8%), que resulta em baixos valores de condutividade hidráulica vertical (Kv) na camada superficial do

solo, o que pode prejudicar o processo de infiltração nessas áreas (GASPAR; CAMPOS; CADAMURO, 2007).

A Estação Usina do Pandeiros Montante (código: 44250000) recebeu esse nome por estar instalada a montante da PCH Pandeiros (Pequena Central Hidrelétrica), instalada em 1958 no município de Januária (MG). Essa estação corresponde a uma pequena área de drenagem (3.230 km²), com 72% localizados sobre o SAU, no lado sul, dentro do estado de Minas Gerais, onde a altitude varia de 521 a 853 m, com média de 675 m. O volume escoado diariamente corresponde a uma lâmina média de 0,6 mm/dia (Tabela 6.7). A jusante dessa estação e da PCH está localizada a Estação Cachoeira Grande, ou Estação Rio Pandeiros (44°45'12.81"W, 15°30'44.49"S), que operou de 1946 a 1958 (anteriormente à operação da usina), denominada Estação Cachoeira Grande Montante (código: 44260000).

Tabela 6.7 – Dados médios das estações analisadas nas sub-bacias dos rios Pandeiros e Japoré.

| Estação | Nome | Área (km ²) | Volume Escoado (mm/dia) | Vazão Média (m ³ /s) | Vazão Mínima (m ³ /s) | Vazão Máxima (m ³ /s) | Vazão de Base (m ³ /s) | | |
|----------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|
| | | | | | | | Média | Mínima | Máxima |
| 44250000 | Usina do Pandeiros Montante | 3.230 | 0.6 | 23,4 | 8,1 | 147,0 | 19,5 | 7,0 | 88,0 |
| 44540000 | Fazenda Bom Retiro | 624 | 0.3 | 2,0 | 0,4 | 39,2 | 1,5 | 0,0 | 21,0 |

Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Com a segunda menor área de drenagem analisada, a Estação Fazenda Bom Retiro (código: 44540000), instalada no rio Japoré, tem uma das menores taxas de volume escoado – 0,3 mm/dia –, com vazão média de 2 m³/s, cuja vazão corre diretamente para o rio São Francisco (Tabela 6.7). Apenas 28% dessa área de drenagem estão sobre o SAU, onde a altitude varia de 625 a 828 m, com média de 708 m. O limite do SAU nessa sub-bacia situa-se 36,5 km a montante da Estação Fazenda Bom Retiro, onde está localizada a Cachoeira de Miravânia (44°24'7,3"W, 14°46'56,61"S). Nessa sub-bacia, situa-se o rio Calindó, afluente do rio Japoré; porém, a confluência desses dois rios está a jusante da estação analisada; por isso, a contribuição desse afluente não foi contabilizada nesta análise.

6.3.2.3 Sub-bacia do rio Carinhanha

Bastante estudada pelo meio acadêmico, devido à sua importância econômica e localização, pois nela está a divisa dos estados de Minas Gerais e Bahia, contemplando, parcialmente, quatro municípios baianos e sete mineiros, a sub-bacia do rio Carinhanha é a terceira maior em relação à área sobre o SAU (69%).

Sua área é bem preservada, de acordo com dados de uso do solo (MAPBIOMAS, 2020): 56,3% da área ocupados por campos, 5,8% por florestas e 31,8% por Savana. Das áreas utilizadas com outros usos (6,1%), 437 km² estão ocupados por pastagens; 215 km², por culturas perenes e anuais; 17 km², por florestas plantadas; e 166 km² foram classificados como outras áreas não vegetadas.

Nessa sub-bacia, foram analisadas cinco estações, sendo uma instalada no rio Itaguari (Fazenda Porto Alegre, código: 45170001), uma no rio Coxá (Capitânea, código: 45220000) e três no rio Carinhanha (São Gonçalo, código: 45131000; Lagoa das Pedras, código: 45210000; Juvenília, código: 45260000). Todas estão instaladas a jusante do SAU, sendo que Lagoa das Pedras está à jusante de São Gonçalo e Fazenda Porto Alegre e Juvenília está a jusante de Lagoa das Pedras e Capitânea.

Nessa sub-bacia, que tem 69% de sua área sobre o SAU, todas as estações apresentaram coerência e continuidade nas áreas e vazões médias encontradas (Tabela 6.8). A altitude sobre o SAU varia entre 518 e 949 m, com média igual a 739 m. O volume escoado nas áreas de drenagem varia entre 0,9 e 1 mm/dia, à exceção da área de drenagem da Estação Capitânea, que se situa mais ao sul, já no limite de transição do aquífero, que apresentou taxa de 0,4 mm/dia.

Tabela 6.8 – Dados médios das estações analisadas na sub-bacia do rio Carinhanha.

| Estação | Nome | Área (km ²) | Volume Escoado (mm/dia) | Vazão Média (m ³ /s) | Vazão Mínima (m ³ /s) | Vazão Máxima (m ³ /s) | Vazão de Base (m ³ /s) | | |
|----------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|
| | | | | | | | Média | Mínima | Máxima |
| 45131000 | São Gonçalo | 6.020 | 1.0 | 241,3 | 9,69 | 1.917,4 | 60,5 | 22,0 | 189,0 |
| 45170001 | Fazenda Porto Alegre | 5.850 | 0.9 | 68,0 | 34,2 | 235,1 | 57,0 | 23,0 | 139,0 |
| 45210000 | Lagoa das Pedras | 12.600 | 0.9 | 61,8 | 38,9 | 204,9 | 119,5 | 46,0 | 328,0 |
| 45220000 | Capitânea | 2.380 | 0.4 | 131,7 | 71,1 | 425,5 | 10,5 | 3,0 | 47,0 |
| 45260000 | Juvenília | 16.300 | 0.8 | 12,4 | 2,9 | 76,7 | 131,0 | 53,0 | 468,0 |

Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Essas estações fluviométricas apresentaram diminuição média de até 0,5% na vazão anual, bem parecida com o decréscimo mostrado pelas séries de vazões

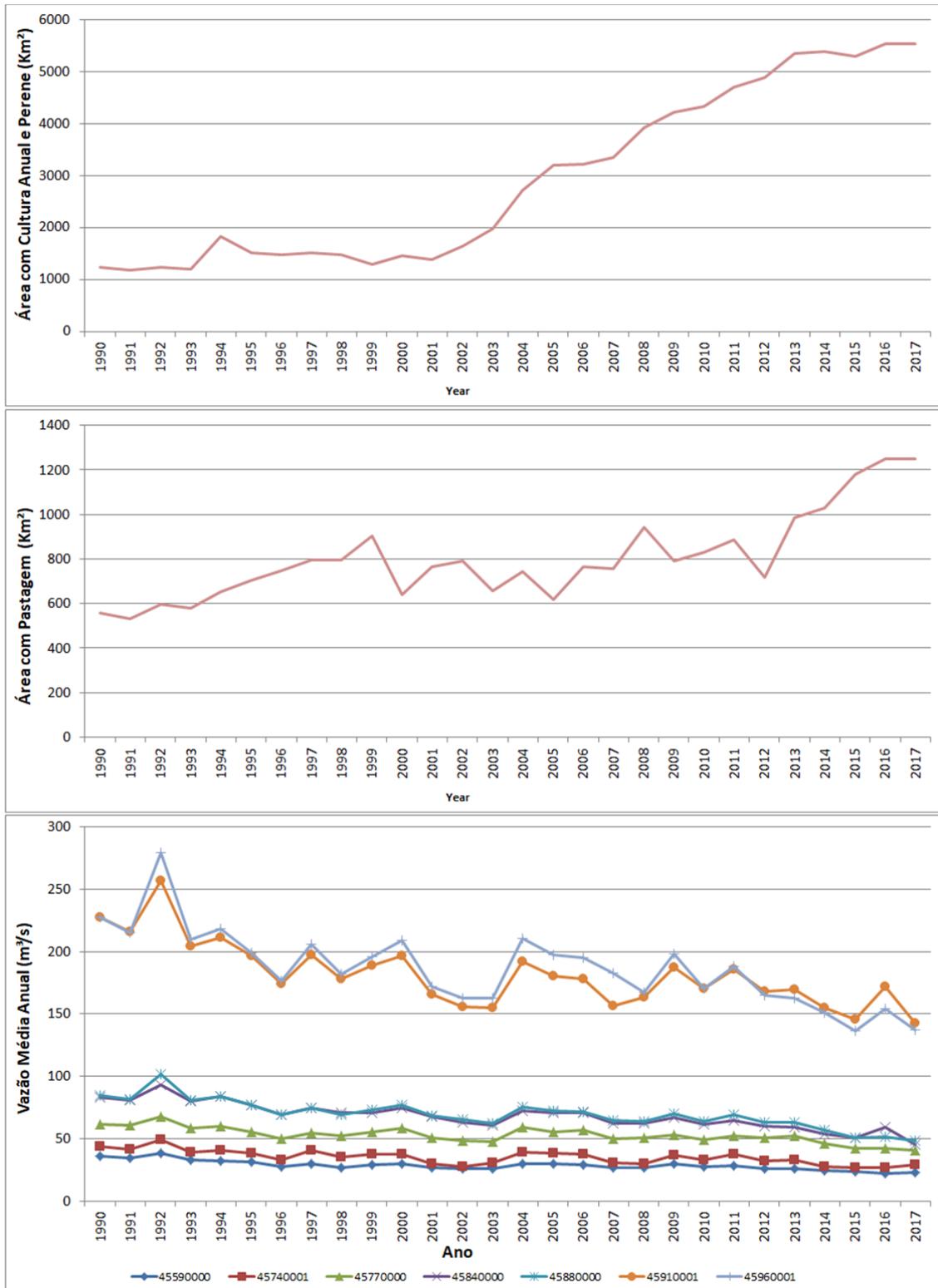
das estações Usina Pandeiros e Fazenda Bom Retiro; porém, menor que a observada na estação de jusante no rio Urucuia (São Romão).

O uso de irrigação por pivô central aumentou entre os anos de 2000 e 2017, passando de 1,5 km² para 99,7 km² no final desse período, com 57,8 km² localizados a montante da Estação de São Gonçalo (código: 45131000), que necessita de uma vazão de 30 m³/s, o que corresponde a 12,4% da vazão média do rio, mas é superior à vazão mínima observada e à vazão de base mínima, o que pode gerar problemas na manutenção da vazão nesse trecho do rio Carinhanha no período de estiagem. Os outros 41,9 km² estão localizados a montante da Estação Fazenda Porto Alegre (código: 45170001), necessitando de uma vazão de 24,2 m³/s, que representa 36% da vazão média do rio e 71% da vazão mínima observada no rio Itaguari, mas é maior que a vazão de base mínima, o que demonstra a importância de se acompanhar as outorgas nessa sub-bacia.

6.3.2.4 Sub-bacia do rio Corrente

A sub-bacia do rio Corrente ocupa uma área sobre o SAU de 34,3 mil km², sendo 78,3% situados sobre o SAU, dos quais 24,6% já foram desmatados e destinados a outros usos, como pastagem (3,9% – 1.112 km²), núcleos urbanos (0,1% – 11 km²), floresta plantada (0,9% – 271 km²) e plantações de culturas perenes e anuais (19,7% – 5.661 km²). Além disso, existem várias áreas, totalizando 686 km², que estão não vegetadas e susceptíveis à ação de processos erosivos. As áreas utilizadas na agricultura começaram a crescer exponencialmente a partir do ano de 2002, enquanto as áreas de pastagem vinham crescendo desde 1985, mas, em 2013, observou-se um salto nesse crescimento, que alcançou 1.251 km² em 2016 e 2017 (Figura 6.19).

Figura 6.19 – Evolução, ano a ano, da área plantada e com pastagem sobre o SAU, e da vazão nas estações analisadas na bacia do rio Corrente.



Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Nessa sub-bacia, foram analisadas sete estações fluviométricas, sendo que quatro estão localizadas a montante: Correntina (código: 45590000), no rio Correntina; Mocambo (código: 45740001), no rio do Meio; Arrojado (código: 45770000), no rio Arrojado; Gatos (código: 45840000) no rio Formoso. A Estação Colônia do Formoso (código: 45880000) está localizada a jusante da Estação Gatos, enquanto a Estação Santa Maria da Vitória (código: 45910001) está situada a jusante de todas as estações citadas anteriormente. A Estação Porto Novo (código: 45960001) está instalada a jusante de Santa Maria da Vitória e foi analisada com o intuito de se avaliar a continuidade das vazões nessa sub-bacia, que tem 78% de sua área sobre o SAU, onde a altitude varia entre 536 e 1019 m, com média igual a 785 m. Nela, o volume escoado nas áreas de drenagem varia entre 0,5 e 1 mm/dia, sendo que as estações Arrojado (0,9 mm/dia) e Gatos (1,0 mm/dia) tiveram os maiores volumes escoados e cujas nascentes se situam na mesma linha das nascentes dos rios Itaguari e Carinhanha, que mostraram valores similares (Tabela 6.9).

Tabela 6.9 – Dados das vazões totais e de base das estações analisadas na sub-bacia do rio Corrente.

| Estação | Nome | Área (km ²) | Volume Escoado (mm/dia) | Vazão Média (m ³ /s) | Vazão Mínima (m ³ /s) | Vazão Máxima (m ³ /s) | Vazão de Base (m ³ /s) | | |
|----------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|
| | | | | | | | Média | Mínima | Máxima |
| 45590000 | Correntina | 3.900 | 0.7 | 32,6 | 21,1 | 109,7 | 30,5 | 19,0 | 73,0 |
| 45740001 | Mocambo | 7.950 | 0.5 | 41,7 | 20,4 | 200,6 | 38,0 | 20,0 | 120,0 |
| 45770000 | Arrojado | 5.540 | 0.9 | 58,8 | 38,5 | 218,5 | 55,0 | 26,0 | 135,0 |
| 45840000 | Gatos | 7.130 | 1.0 | 80,7 | 50,1 | 238,3 | 76,0 | 33,0 | 159,0 |
| 45880000 | Colônia do Formoso | 9.550 | 0.8 | 83,2 | 51,3 | 312,1 | 77,5 | 32,0 | 207,0 |
| 45910001 | Santa Maria da Vitória | 29.600 | 0.6 | 212,1 | 122,5 | 823,8 | 197,0 | 99,0 | 591,0 |
| 45960001 | Porto Novo | 31.000 | 0.6 | 216,5 | 125,7 | 816,2 | 200,0 | 97,0 | 626,0 |

Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

As vazões dessas estações fluviométricas apresentaram tendência de diminuição média de até 2,69% na vazão anual, no período de 1985 a 2014, valor próximo ao encontrado para a Estação de São Romão (rio Urucuia).

Como a linha de tendência não sofreu alterações bruscas entre os períodos anterior e posterior a 2001, e buscando mais evidências de diferença significativa, as séries foram comparadas, presumindo-se médias e variâncias equivalentes, usando o teste t ao nível de 0,05 de significância.

Nesse caso, concluiu-se que não há diferença significativa entre as médias das vazões que ocorreram antes e depois de 2001 nessa sub-bacia (p -value < 0.0001). Conclui-se, assim, que não há indícios de que o aumento da agricultura, exponencialmente após 2001, seja a causa da diminuição na vazão do rio Corrente, que é composta por 86% da vazão de base proveniente do SAU. A diminuição da vazão a partir de 1992 é mais provavelmente correlacionada à diminuição da precipitação que ocorreu após 1990, gerando diminuição da recarga do sistema aquífero.

Na bacia do rio Corrente, a irrigação por pivô central começou em 1985, mas se intensificou a partir do ano 2000, chegando a 331,1 km² em 2017. As áreas irrigadas estão situadas a montante das estações Correntina (código: 45590000), Mocambo (código: 45740001), Arrojado (código: 45770000) e Gatos (código: 45840000) (Tabela 6.10).

Observa-se, nas áreas a montante das estações Correntina e Mocambo, que as vazões necessárias para irrigação estão muito próximas dos valores das vazões médias do rio e maiores que a mínima. Na área a montante da Estação Gatos, a vazão utilizada é 50% maior que as vazões média e mínima observadas.

Como nos períodos de recessão, a vazão dos rios é menor que a média histórica da estação e mais próxima ao valor mínimo, além de ser o período de menor pluviosidade, o que ocasiona aumento da necessidade hídrica para irrigação das culturas. Nesses períodos, a vazão dos rios não é suficiente para suprir essa demanda, o que justifica e indica o aumento do uso da água subterrânea nas áreas de drenagem a montante dessas estações. Portanto, há necessidade de gestão mais eficiente dos recursos hídricos nessas áreas.

Tabela 6.10 – Comparativo das vazões totais com as informações da irrigação por pivô central nas respectivas áreas de drenagem das estações analisadas na sub-bacia do rio Corrente.

| Estação | Nome | Vazão Média (m ³ /s) | Vazão Mínima (m ³ /s) | Vazão de Base Mínima (m ³ /s) | Área com Pivô Central a Montante da Estação (km ²) | Vazão Necessária para Irrigação (m ³ /s) | Relação da Vazão para Irrigação e Vazão Média |
|--------------|------------|---------------------------------|----------------------------------|--|--|---|---|
| 45590000 | Correntina | 32,6 | 19,0 | 21,1 | 40,58 | 23,3 | 71,5 % |
| 45740001 | Mocambo | 41,7 | 20,0 | 20,4 | 62,94 | 36,2 | 86,8 % |
| 45770000 | Arrojado | 58,8 | 26,0 | 38,5 | 17,57 | 10,1 | 17,2 % |
| 45840000 | Gatos | 80,7 | 33,0 | 50,1 | 210,02 | 120,8 | 149,7 % |
| Total | | | | | 331,11 | 190,4 | - |

Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

6.3.2.5 Sub-bacia do rio Grande

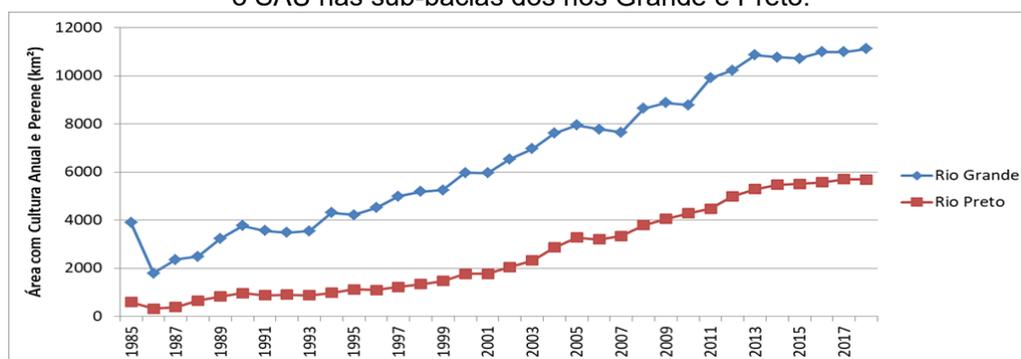
Essa sub-bacia tem área total de 77.045 km², dos quais quase 60% estão sobre o SAU (45.785 km²). Trata-se da região mais conhecida, onde estão inseridos os municípios de Barreiras e Luís Eduardo Magalhães, e com maior área de uso agrícola.

A nascente do rio Grande e seus primeiros afluentes ocupam uma área sobre o SAU de 31.695 km², com apenas 57,62% preservados, com formação campestre (16,5% – 5.230 km²), florestal (8,3% – 2.631 km²) e savânica (32,82% – 10.402 km²). Nessa área, a plantação de culturas anuais, principalmente soja e algodão, ocupa 11.114 km² (35,1%). Os demais 7,28% estão sendo usados para pastagem (6,3% – 2.012 km²), silvicultura (0,14% – 45 km²), áreas urbanas (0,14% – 43 km²) e outras áreas não vegetadas (0,7% – 222 km²).

O principal afluente do rio Grande é o Preto, que tem sua nascente sobre o SAU, mas sua confluência com o rio Grande só ocorre 251 km após o início de sua descida do platô. A área da sub-bacia do rio Preto sobre o SAU é de 14.089 km². O uso preponderante do solo é a plantação de culturas perenes e anuais (5.692 km², o que corresponde a 40,4% de sua área do SAU), enquanto 58,8% (8.284 km²) ainda estão preservados, de acordo com o mapa de uso e ocupação do solo (MAPBIOMAS, 2020). A área de pastagem ocupa 48 km² (0,34%) e apenas 0,46% (65 km²) nessa sub-bacia, sobre o SAU, não está vegetada.

A agricultura anual e perene, na região, cresce de forma exponencial desde a década de 1980 (MAPBIOMAS, op. cit.) (Figura 6.20).

Figura 6.20 – Evolução, ano a ano, da área plantada, com culturas perenes e anuais, sobre o SAU nas sub-bacias dos rios Grande e Preto.



Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Nessa sub-bacia, foram avaliadas as séries de 11 estações fluviométricas, porém apenas quatro estão instaladas no próprio rio: Sítio Grande (código: 46415000), instalada a montante, tem 96% de sua área sobre o SAU; Barreiras (código: 46550000), instalada após as confluências com os rios das Fêmeas e São Desidério, mas antes da confluência com o rio de Ondas; São Sebastião (código: 46610000), instalada após as confluências com os rios de Ondas e Branco; e Boqueirão (código: 46902000), instalada após a confluência do rio Preto.

Das outras estações avaliadas na sub-bacia do rio Grande, três estão instaladas em afluentes diretos do rio Grande, incluindo: rio das Fêmeas (Derocal, código: 46455000), rio São Desidério (Fazenda Coqueiro, código: 46490000) e rio de Ondas (Fazenda Redenção, código: 46543000), cujas áreas de drenagem estão 98, 96 e 99% no SAU, respectivamente. Duas estações estão instaladas no rio de Janeiro (Ponte Serafim Montante, código: 46570000), afluente do rio Branco, onde está instalada a Estação Nova Vida (código: 46590000); ambas têm mais de 95% de sua área sobre o SAU. Estas apresentaram os menores valores de volume escoado na sub-bacia do rio Grande, onde foram encontrados valores de 0,1 a 0,8 mm/dia na taxa de escoamento por metro quadrado, sendo o valor médio de 0,5 mm/dia (Tabela 6.11).

Tabela 6.11 – Dados das vazões totais e de base das estações analisadas na sub-bacia do rio Grande.

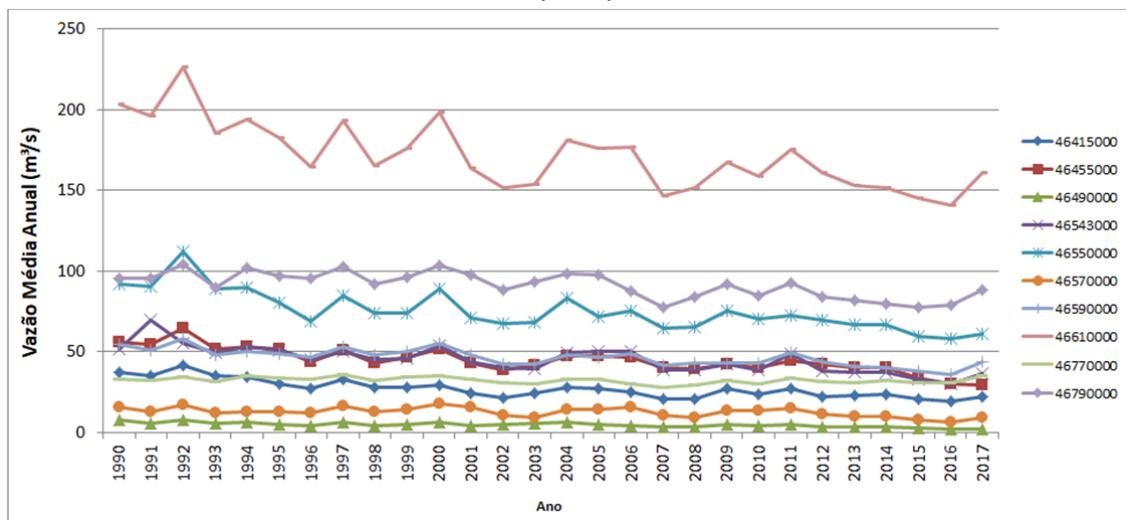
| Estação | Nome | Área (km ²) | Volume Escoado (mm/dia) | Vazão Média (m ³ /s) | Vazão Mínima (m ³ /s) | Vazão Máxima (m ³ /s) | Vazão de Base (m ³ /s) | | |
|----------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------|--------|
| | | | | | | | Média | Mínima | Máxima |
| 46415000 | Sítio Grande | 4.950 | 0.6 | 33,0 | 4,9 | 104,0 | 30,5 | 5,0 | 78,0 |
| 46455000 | Derocal | 6.350 | 0.7 | 50,4 | 25,9 | 173,2 | 47,0 | 20,0 | 125,0 |
| 46490000 | Fazenda Coqueiro | 4.470 | 0.1 | 6,6 | 1,1 | 68,8 | 5,5 | 1,0 | 39,0 |
| 46543000 | Fazenda Redenção | 5.380 | 0.8 | 50,2 | 21,8 | 138,6 | 46,0 | 20,0 | 99,0 |
| 46550000 | Barreiras | 24.400 | 0.3 | 89,0 | 24,6 | 335,0 | 82,0 | 25,0 | 221,0 |
| 46570000 | Ponte Serafim – Montante | 2.710 | 0.5 | 14,4 | 3,9 | 54,0 | 12,5 | 4,0 | 35,0 |
| 46590000 | Nova Vida – Montante | 7.480 | 0.6 | 51,6 | 31,4 | 168,8 | 47,5 | 26,0 | 117,0 |
| 46610000 | São Sebastião | 33.100 | 0.5 | 191,3 | 106,8 | 652,0 | 178,0 | 88,0 | 435,0 |
| 46770000 | Fazenda Bom Jardim* | 6.930 | 0.4 | 35,1 | 23,2 | 66,6 | 32,5 | 12,0 | 58,0 |
| 46790000 | Formosa do Rio Preto* | 14.300 | 0.6 | 101,3 | 65,2 | 308,0 | 101,0 | 33,0 | 249,0 |
| 46902000 | Boqueirão | 65.900 | 0.3 | 265,0 | 184,0 | 477,0 | 248,7 | 91,5 | 861,7 |

Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Nota: As estações destacadas com asterisco (*) estão situadas na sub-bacia do rio Preto, afluente do rio Grande.

Em seu maior afluente, o rio Preto, há duas estações instaladas: Fazenda Bom Jardim (código: 46770000), a montante, e Formosa do Rio Preto (código: 46790000), a jusante, porém a área sobre o SAU não são as mesmas (6.915 km² e 13.768 km², respectivamente), mas, em média, as altitudes nessa parte do SAU são iguais, em torno de 740 m, cuja variação ocorre entre 489 a 908 m. Contudo, não foram observadas alterações nas vazões das estações fluviométricas instaladas nessa sub-bacia que evidenciem correlação entre uso e diminuição da vazão. Ou seja, há diminuição da vazão dos rios, mas a precipitação também diminuiu linearmente, inclusive após 1990, conseqüentemente, diminuindo a recarga que abastece o aquífero, o que pode justificar a diminuição da vazão a partir desse ano (Figura 6.21).

Figura 6.21 – Evolução, ano a ano, da vazão nas estações analisadas na sub-bacia do rio Grande, incluindo seu principal afluente, rio Preto.



Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Antes de 1990, a irrigação por pivô central já existia na sub-bacia do rio Grande, mas, até essa data, a área de 29 km² correspondia a 6% da área ocupada por pivô central. No ano 2000, a área passou a 468 km² e mais que duplicou em 2017 (1.051 km²), sendo que toda essa poligonal se situa a montante das estações Sítio Grande (código: 46415000), Deroval (código: 46455000), Fazenda Redenção (código: 46543000), Ponte Serafim Montante (código: 46570000), Nova Vida Montante (código: 46590000) e Formosa do Rio Preto (código: 46790000) (Tabela 6.12).

Tabela 6.12 – Comparativo das vazões totais com as informações da irrigação por pivô central nas respectivas áreas de drenagem das estações analisadas na sub-bacia do rio Grande.

| Estação | Nome | Vazão Média (m ³ /s) | Vazão Mínima (m ³ /s) | Vazão de Base Mínima (m ³ /s) | Área com Pivô Central a Montante da Estação (km ²) | Vazão Necessária para Irrigação (m ³ /s) | Relação entre Vazão para Irrigação e Vazão Média |
|--------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|--|---|--|
| 46415000 | Sítio Grande | 33,0 | 4,9 | 5,0 | 174 | 20,14 | 61,03% |
| 46455000 | Derocal | 50,4 | 25,9 | 20,0 | 185 | 21,41 | 42,48% |
| 46543000 | Fazenda Redenção | 50,2 | 21,8 | 20,0 | 330 | 38,19 | 76,08% |
| 46570000 | Ponte Serafim – Montante | 14,4 | 3,9 | 4,0 | 105 | 12,15 | 84,39% |
| 46590000 | Nova Vida – Montante | 51,6 | 31,4 | 26,0 | 250 | 28,94 | 56,08% |
| 46790000 | Formosa do Rio Preto* | 101,3 | 65,2 | 33,0 | 7 | 0,81 | 0,80% |
| Total | | | | | 1051 | 121,64 | - |

Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Nota: A estação destacada com asterisco (*) está situada na sub-bacia do rio Preto, afluente do rio Grande.

Observa-se que as vazões necessárias para irrigação, nas áreas a montante das estações, estão bem próximas ao valor da vazão média do rio, o que mostra a necessidade de gestão mais eficiente das águas nessas áreas. Ressalta-se que a relação entre as vazões mínimas observadas e as vazões de base estão muito próximas ou são menores que a vazão necessária para irrigação nas estações de Derocal e Nova Vida – Montante.

6.3.3 Discussões integradas

Apresenta-se, a seguir, um resumo de todos os dados obtidos nesta análise. Ressalta-se que a área em uso sobre o SAU corresponde à soma das áreas ocupadas com cultura anual e perene, floresta plantada, pastagem, infraestrutura urbana e área não vegetada, observada em dois períodos: 1985 a 1990 e 1991 a 2018, lembrando que a expansão agropecuária na região se iniciou a partir de 1990 (Tabela 6.13; (Figura 6.7).

Analisando-se estas informações, conclui-se que a expansão da ocupação das áreas para outros usos ocorreu apenas nas sub-bacias dos rios Urucuaia, Corrente e Grande, onde as vazões diminuíram, em média, 22,39%, enquanto nas sub-bacias dos rios Pandeiros, Japoré e Carinhanha as vazões diminuíram, em média, 12,68%. As bacias com áreas desmatadas e destinadas ao uso

principalmente agrícola foram as que apresentaram menor diminuição de vazão, uma vez que a vazão dos rios é alimentada pelo aquífero regional raso, cuja alimentação depende prioritariamente de parâmetros climáticos, principalmente precipitação e evapotranspiração, pois áreas de cerrado ou florestas apresentam maior evapotranspiração. Ao se substituir áreas de cerrado ou florestas por áreas agrícolas, ocorre diminuição da interceptação e da evapotranspiração. Portanto, principalmente em terrenos planos, as áreas agrícolas podem facilitar a recarga, o que explica os valores encontrados.

A mudança do cerrado nativo para plantio não causa ampla redução na recarga, pois não acarreta compactação ou impermeabilização, de forma que a restrita declividade do terreno, os solos arenosos e o padrão das chuvas são os controles mais significativos do processo de infiltração e recarga efetiva dos aquíferos. Observa-se esse padrão na bacia do rio Urucuia, que experimentou aumento de área de cerrado (provavelmente pelo abandono de pastagens) e, mesmo assim, apresentou redução da vazão no período de recessão das chuvas.

Nas sub-bacias, observou-se que as precipitações diminuíram, em média, 7,53% em toda a região, sendo observados -6,81% na sub-bacia do rio Pandeiros, -7,19% na sub-bacia do rio Japoré, -8,66% na sub-bacia do rio Carinhanha, -5,71% na sub-bacia do rio Corrente e -9,27% na sub-bacia do rio Grande.

Já na área irrigada, observou-se, em função do perímetro de irrigação, uma demanda hídrica de 173 m³/s em toda a região do Urucuia, sendo que essa vazão era apenas 5 m³/s em 1990, ou seja, 34 vezes menor. Entretanto, essa distribuição não é uniforme: 122 m³/s são para a sub-bacia do rio Grande; 38 m³/s para a sub-bacia do rio Corrente; 12 m³/s para a sub-bacia do rio Carinhanha; e 1% para as demais sub-bacias. Essa distribuição, ao longo do tempo, também não foi uniforme, ou seja, em 1990, na sub-bacia do rio Grande, utilizavam-se 3,36 m³/s e, em 2017, esse uso passou para 122 m³/s; na sub-bacia do rio Corrente, o uso na irrigação em 1990 era 0,3 m³/s e, em 2017, passou para 38 m³/s.

Tabela 6.13 – Resumo dos dados obtidos.

| Sub-Bacia (Rio) | Área em Uso sobre o SAU (km ²) | | | Estação | Ano Completo | | | | | | Meses de Recessão (Maio a Julho) | | | | | | Variação Média (%) |
|-----------------|--|----------------|----------|----------|---------------------------------|----------------|----------|-----------------------------------|----------------|----------|----------------------------------|----------------|----------|-----------------------------------|----------------|----------|--------------------|
| | Até 1990 | Depois de 1990 | Variação | | Vazão Total (m ³ /s) | | | Vazão de Base (m ³ /s) | | | Vazão Total (m ³ /s) | | | Vazão de Base (m ³ /s) | | | |
| | | | | | Até 1990 | Depois de 1990 | Variação | Até 1990 | Depois de 1990 | Variação | Até 1990 | Depois de 1990 | Variação | Até 1990 | Depois de 1990 | Variação | |
| Urucuia | 255 | 310 | + 22% | 43980002 | 200.97 | 239.02 | 19% | 143.65 | 167.28 | 16% | 97.37 | 93.37 | -4% | 87.33 | 85.36 | -2% | 18.93 |
| Pandeiros | 144 | 111 | -23% | 44250000 | 26.94 | 19.66 | -27% | 22.49 | 16.51 | -27% | 20.74 | 15.04 | -27% | 20.17 | 14.68 | -27% | -27.02 |
| Japoré | 371 | 127 | -66% | 44540000 | 2.27 | 1.66 | -27% | 1.69 | 1.32 | -22% | 1.34 | 1.10 | -18% | 1.26 | 1.02 | -20% | -26.87 |
| Carinhanha | 1.251 | 836 | -33% | 45131000 | 73.62 | 61.95 | -16% | 65.06 | 55.05 | -15% | 60.13 | 50.40 | -16% | 58.59 | 49.38 | -16% | -20.57 |
| | | | | 45170001 | 67.08 | 56.29 | -16% | 61.90 | 52.52 | -15% | 59.80 | 50.60 | -15% | 58.92 | 49.99 | -15% | |
| | | | | 45210000 | 143.74 | 118.84 | -17% | 129.68 | 108.28 | -17% | 121.86 | 101.28 | -17% | 119.28 | 99.65 | -16% | |
| | | | | 45220000 | 14.71 | 9.87 | -33% | 12.78 | 8.68 | -32% | 11.55 | 7.80 | -33% | 11.18 | 7.62 | -32% | |
| | | | | 45260000 | 161.29 | 127.87 | -21% | 145.43 | 116.18 | -20% | 134.38 | 106.81 | -21% | 131.78 | 105.08 | -20% | |
| Corrente | 3.027 | 7.742 | 156% | 45590000 | 35.39 | 30.27 | -14% | 33.06 | 28.54 | -14% | 31.70 | 27.47 | -13% | 31.24 | 27.02 | -14% | -16.08 |
| | | | | 45740001 | 46.62 | 37.44 | -20% | 42.23 | 34.37 | -19% | 38.71 | 31.49 | -19% | 37.72 | 30.78 | -18% | |
| | | | | 45770000 | 62.50 | 55.68 | -11% | 58.45 | 52.16 | -11% | 56.21 | 50.22 | -11% | 55.49 | 49.51 | -11% | |
| | | | | 45840000 | 87.12 | 73.88 | -15% | 82.31 | 69.58 | -15% | 79.35 | 67.08 | -15% | 78.35 | 66.20 | -16% | |
| | | | | 45880000 | 90.75 | 75.30 | -17% | 84.46 | 70.40 | -17% | 81.14 | 67.19 | -17% | 80.00 | 66.33 | -17% | |
| | | | | 45910001 | 236.95 | 190.95 | -19% | 219.42 | 177.81 | -19% | 205.79 | 167.42 | -19% | 202.41 | 164.81 | -19% | |
| Grande | 6.878 | 20.065 | 192% | 45960001 | 236.82 | 199.21 | -16% | 217.43 | 184.43 | -15% | 199.59 | 170.35 | -15% | 196.22 | 167.53 | -15% | -13.39 |
| | | | | 46415000 | 36.21 | 29.98 | -17% | 33.48 | 27.89 | -17% | 31.27 | 25.64 | -18% | 30.62 | 25.13 | -18% | |
| | | | | 46455000 | 52.29 | 48.67 | -7% | 48.80 | 45.54 | -7% | 45.94 | 43.04 | -6% | 45.15 | 41.99 | -7% | |
| | | | | 46490000 | 7.80 | 5.30 | -32% | 6.60 | 4.54 | -31% | 5.58 | 3.91 | -30% | 5.35 | 3.74 | -30% | |
| | | | | 46543000 | 52.52 | 48.01 | -9% | 48.25 | 43.78 | -9% | 45.13 | 40.78 | -10% | 44.07 | 39.37 | -11% | |
| | | | | 46550000 | 97.72 | 80.99 | -17% | 89.64 | 74.92 | -16% | 82.18 | 70.54 | -14% | 80.42 | 68.87 | -14% | |
| | | | | 46570000 | 15.39 | 13.60 | -12% | 13.60 | 11.63 | -14% | 13.25 | 11.08 | -16% | 12.77 | 10.37 | -19% | |
| | | | | 46590000 | 54.62 | 48.98 | -10% | 50.26 | 45.39 | -10% | 48.39 | 43.65 | -10% | 47.60 | 42.70 | -10% | |
| | | | | 46610000 | 203.88 | 180.67 | -11% | 189.65 | 168.21 | -11% | 177.22 | 156.29 | -12% | 173.59 | 152.60 | -12% | |
| | | | | 46770000 | 37.57 | 32.85 | -13% | 35.21 | 30.52 | -13% | 34.15 | 29.48 | -14% | 33.60 | 28.91 | -14% | |
| 46790000 | 105.85 | 96.65 | -9% | 105.52 | 96.39 | -9% | 91.12 | 84.61 | -7% | 91.06 | 84.57 | -7% | | | | | |
| 46902000 | 301.27 | 269.00 | -11% | 282.89 | 254.34 | -10% | 261.82 | 238.38 | -9% | 256.00 | 232.63 | -9% | | | | | |

Observou-se, ainda, que, na sub-bacia do rio Grande, a necessidade hídrica para agricultura cresceu de forma exponencial desde a década de 1980 (vide Figura 6.20), mas, na sub-bacia do rio Corrente, essa demanda começou a crescer exponencialmente a partir do ano de 2002 (vide Figura 6.19).

Entretanto, entre 1990 e 2018, as vazões na sub-bacia do rio Corrente (16,08%) diminuíram mais do que as vazões na sub-bacia do rio Grande (13,39%), mesmo com o maior aumento exponencial da agricultura na bacia do rio Grande (Tabela 6.13). Já as vazões na sub-bacia do rio Carinhonha foram superiores (20,57%) às observadas na bacia do rio Corrente, enquanto a agricultura nessa sub-bacia ocupa apenas 1,6% da área sobre o SAU. Tais informações demonstram que o aumento do uso do solo nas bacias dos rios Corrente e Grande não impactou de forma significativa na vazão dos rios, indicando que a diminuição da chuva é a principal responsável pela redução da vazão nos rios.

6.3.4 Análise da recarga do sistema aquífero Urucuia

Para verificação do controle da distribuição temporal das chuvas na recarga do Sistema Aquífero Urucuia, foram utilizados dados de monitoramento em poços instalados e dedicados a esse fim, isto é, estruturas utilizadas exclusivamente para monitoramento dos níveis d'água do aquífero e não para a produção de água.

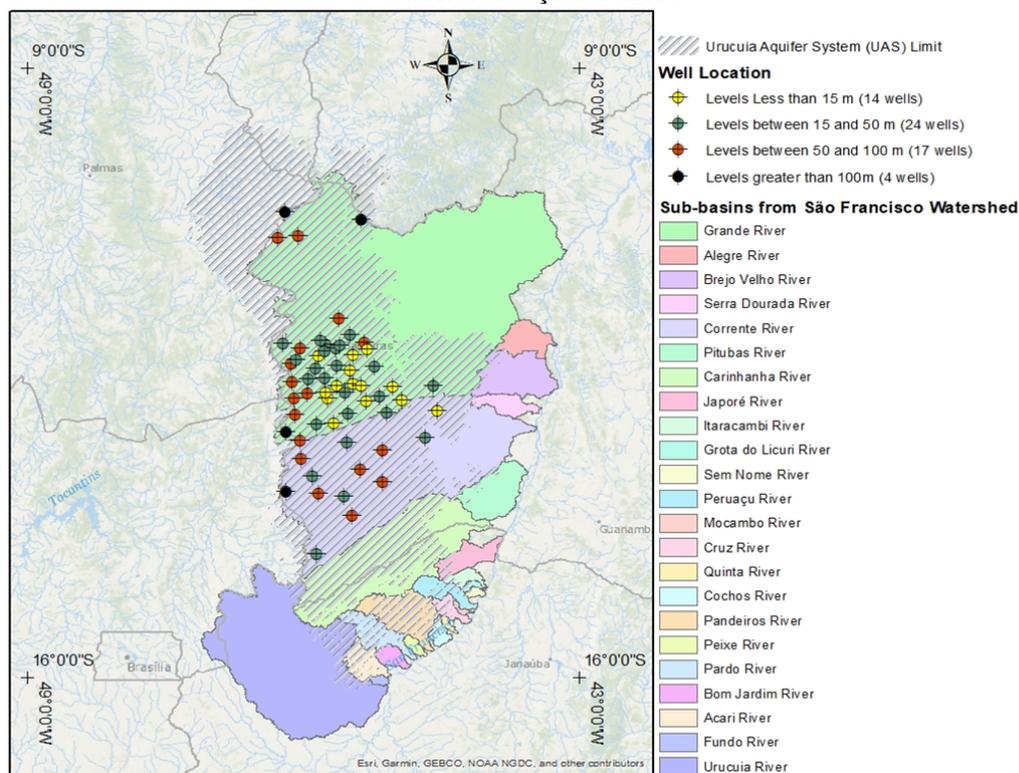
Os dados obtidos por medição automática (com auxílio de transdutores de pressão – *divers*) de 59 poços foram avaliados (Figura 6.22). Como o conjunto de dados é heterogêneo em termos de períodos de aquisição e de falhas nas séries, não foi possível realizar uma avaliação estatística nos moldes dos procedimentos aplicados aos dados de precipitação. Assim, foi realizada apenas uma avaliação pormenorizada dos dados de flutuação de níveis em cada poço.

O período de medição compreende o intervalo entre os anos de 2011 e 2018, sendo que as medições não se iniciaram no mesmo momento em todos os poços. Optou-se, assim, por avaliar o comportamento da variação dos níveis individualmente, em períodos de diferentes anos para cada poço. Para análise dos dados de flutuação dos níveis, foram utilizados períodos coincidentes com os dados das chuvas das estações pluviométricas mais próximas aos poços analisados, considerando também os períodos de diferentes anos de observação em cada poço, de modo a apresentar um panorama geral sobre a recarga do aquífero Urucuia e

uma análise do controle das chuvas nas elevações dos níveis freáticos no período mais recente.

A recarga do Sistema Aquífero Urucuia é exclusivamente oriunda de águas de chuvas que precipitam sobre o aquífero. Essa afirmação é corroborada por dados de isótopos estáveis de oxigênio e deutério (BARBOSA, 2009; BARBOSA et al., 2010).

Figura 6.22 – Mapa de localização dos 59 poços observados classificados em função do nível do lençol freático.



Fonte: Elaborado por Myrta S.B. Vieira, 2020.

A avaliação da resposta das chuvas na elevação dos níveis do aquífero se dá da seguinte forma:

- As chuvas se iniciam entre setembro e novembro, sendo que a regularização das precipitações é mais comum a partir do mês de outubro. Entretanto, há anos anômalos, em que o início das chuvas sofre atraso e as chuvas regulares são observadas só a partir do mês de novembro.
- O início da elevação dos níveis freáticos se dá a partir de janeiro/fevereiro, mostrando que o processo de recarga é relativamente rápido nessa região. Para situações em que a superfície freática se encontra em profundidades mais rasas (em geral, <15 m) de aquíferos confinados, a resposta pode ser aleatória, sem

correlação com o início das chuvas. Contudo, em casos em que as profundidades são maiores (>50 m), o início da elevação é apenas observado no mês de março.

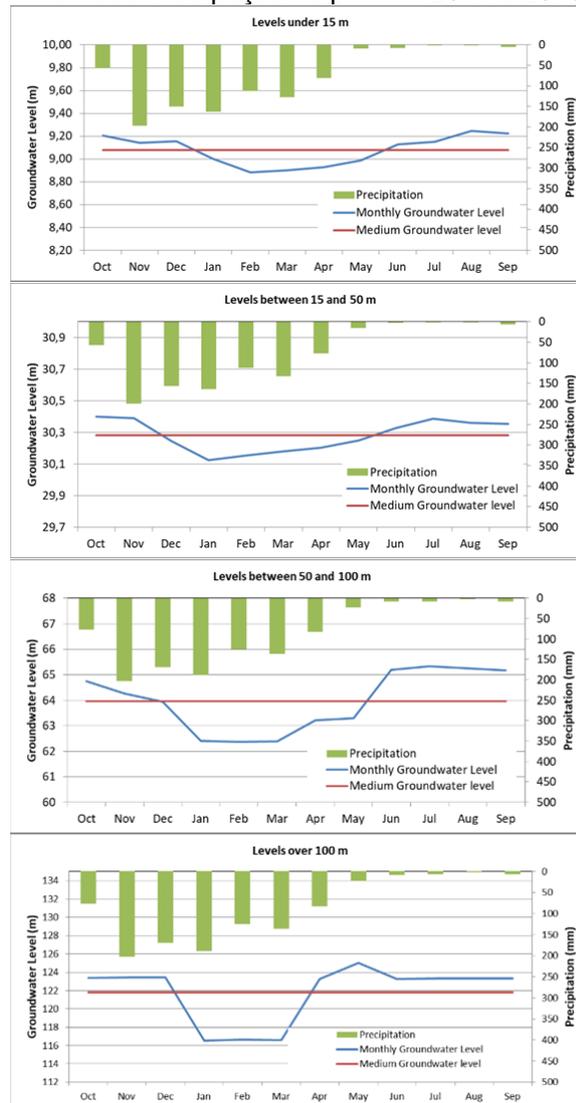
- O atraso entre o início das chuvas e o começo da resposta da elevação da zona saturada é esperado, sendo devido ao tempo necessário para que as condições de recarga sejam alcançadas, isto é, para que se amplie a umidade na porção superficial da zona não saturada (Figura 6.23).
- Depois de alcançadas as condições ideais para que as plumas de umidade migrem a partir de potencial gravitacional e potencial de umidade, a recarga se processa em resposta aos sucessivos eventos de precipitação.
- A recarga efetiva na região, em média, processa-se entre janeiro e abril. A partir de maio, o nível freático nos poços de monitoramento inicia seu declínio natural, em função da descarga do aquífero para alimentar a rede de cursos d'água superficial.

A recarga se processa em resposta às chuvas, de forma que, em média, quanto maior a altura de chuvas acumuladas no ano hidrológico, maior será a recarga efetiva. Entretanto, o controle da distribuição temporal das chuvas imprime importância maior que o montante de chuvas acumulado no período anterior. A continuidade dos eventos de precipitação no período regular das chuvas é fundamental para que as plumas de umidade alcancem a zona saturada. Quando o período das chuvas sofre interrupções prolongadas (entre 10 e 20 dias), nos meses de janeiro e fevereiro, há quebra significativa da recarga efetiva no período. Essa observação não é exclusiva na área do SAU, mas aplicável a aquíferos livres em condições de meio físico similares (GOMES, 2019).

A avaliação da resposta do acumulado de chuvas anômalas, na subida dos níveis freáticos, mostra que esses eventos imprimem importante controle na recarga. A observação de pulsos de elevação dos níveis se dá de forma relativamente rápida após períodos com acumulação de dezenas de milímetros de precipitação. Esse comportamento pode ser facilmente observado na análise das tabelas de dados chuva *versus* variação de níveis.

A partir dessa avaliação, conclui-se que, em anos com precipitação abaixo da média histórica, a recarga é limitada. Ainda mais prejudiciais à recarga são os períodos prolongados sem precipitação, chamados de “veranicos”, justamente no pico da estação chuvosa, entre dezembro e fevereiro.

Figura 6.23 – Correlação entre a precipitação mensal média e o nível freático médio mensal observados nos poços no período 2011 a 2018.



Fonte: Elaborada por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

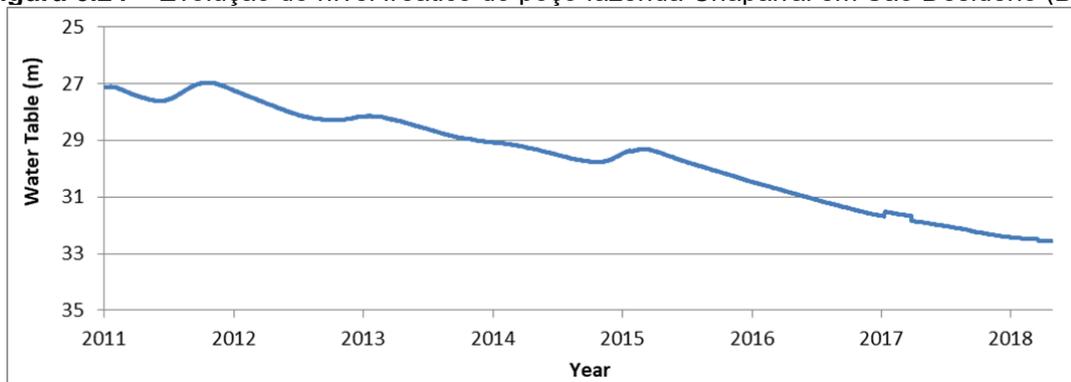
A análise dos dados de flutuação em diferentes anos de diferentes poços de monitoramento mostra que a flutuação dos níveis em um ciclo hidrológico varia amplamente. Essa variação anual ou Δh do nível freático pode ser, na prática, considerada a quantificação da recarga em um ciclo hidrológico. Há poços em que essa variação é inferior a 0,50 m, o que indica limitação estável da recarga, uma vez que essa variação se dá em todo o período de avaliação (2011 a 2018). Por outro lado, o mais comum são poços em que as variações flutuam entre 0,75 e 2,2 m, com média na ordem de 1,2 m.

Nos poços em que a variação da carga potenciométrica é muito restrita (inferior a 50 cm), a interpretação é de que o poço monitora porções do aquífero

confinado ou semiconfinado e não a flutuação, devido à recarga natural observada nas porções livres do sistema aquífero. Nesses casos, a camada confinante amortece a carga hidráulica, devido exclusivamente à recarga direta, uma vez que a água precisa percolar através do aquitarde. Por isso, a resposta é mais lenta e atenuada (a elevação é atrasada com relação ao período chuvoso e as variações são reduzidas).

Alguns poços mostram diminuição progressiva do nível freático ao longo do período de análise, o que poderia ser interpretado como redução contínua da recarga. Como exemplo, cita-se o Poço Fazenda Chaparral (código: 2900021798), no município de São Desidério (BA), que apresenta o seguinte comportamento: nível a 27,1 m da superfície em 07.09.2011 e nível a 32,5 m em 31.12.2018. O rebaixamento de 5,4 m se dá de forma contínua, em uma taxa relativamente constante (Figura 6.24). Esse comportamento não é necessariamente atribuído à perda de recarga; provavelmente, é devido à exploração do aquífero em área adjacente. Para se ter uma explicação inequívoca para esse comportamento, é preciso realizar o cadastro universal nas adjacências do poço de monitoramento para se certificar da ausência de poços de produção. O cone de depressão de um poço de bombeamento pode interceptar o local em que o poço de monitoramento está instalado e alterar o comportamento natural de seu nível potenciométrico.

Figura 6.24 – Evolução do nível freático do poço fazenda Chaparral em São Desidério (BA).

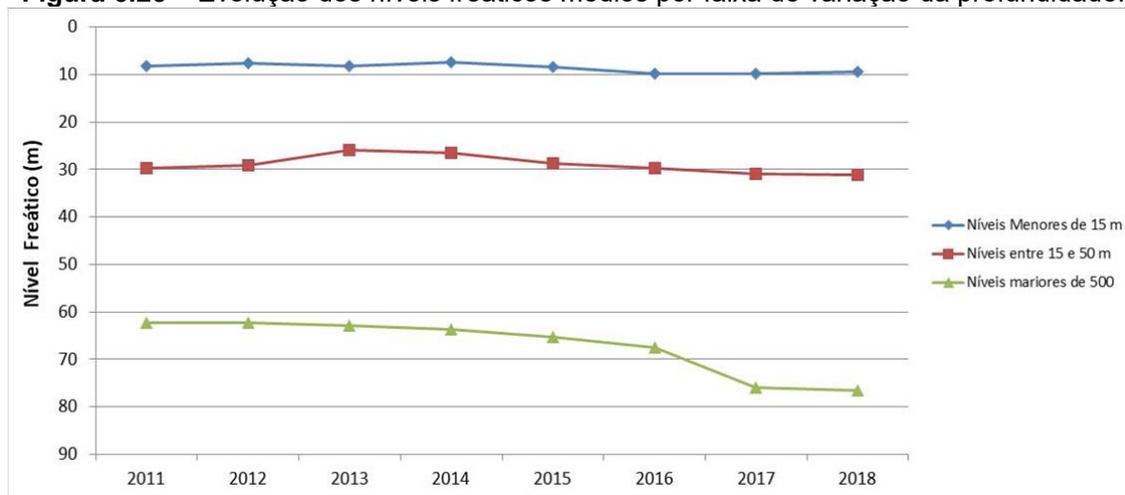


Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

A análise dos níveis médios anuais dos poços mostrou que não ocorreu variação expressiva nos níveis do aquífero livre regional (mais rasos, até 15 m) e do aquífero confinado (intermediários, entre 15 e 50 m), apenas uma tênue diminuição, que pode ser também devida à diminuição da recarga em função da variabilidade climática.

Porém, a avaliação dos níveis mais profundos (maiores que 50 m), vinculados ao aquífero livre profundo, mostra diminuição de 8 m de rebaixamento a partir de 2017, o que remete à exploração dos aquíferos através dos poços profundos, para suprir a demanda da irrigação nos períodos de estiagem, que deve influenciar na reserva não renovável (reserva permanente) do Sistema Aquífero Urucuia (Figura 6.25).

Figura 6.25 – Evolução dos níveis freáticos médios por faixa de variação da profundidade.



Fonte: Elaborada por Myrta S.B. Vieira, 2020.

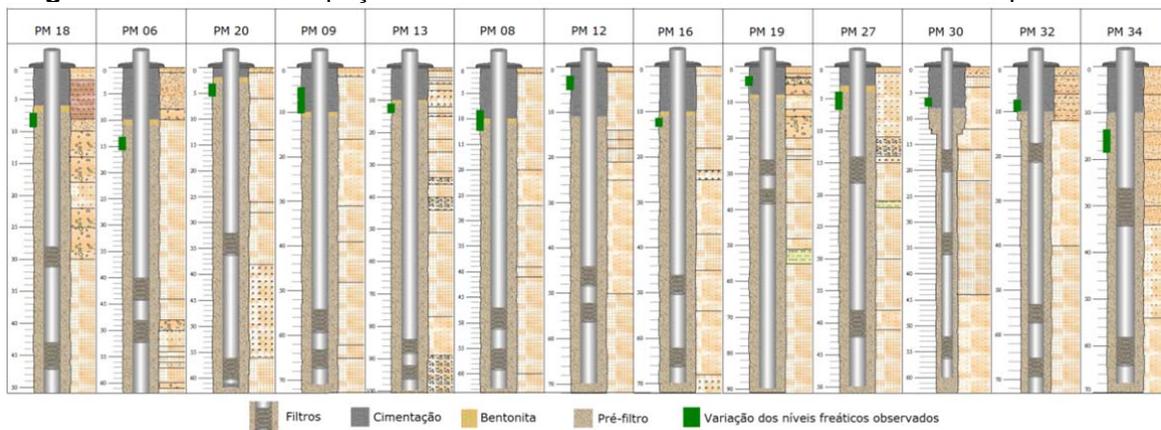
Contudo, para se refinar a análise do comportamento da recarga do Sistema Aquífero Urucuia, as seguintes condicionantes devem ser estabelecidas:

- mapeamento e reconhecimento do subtipo de reservatório no qual o poço de monitoramento está inserido (livre regional, semiconfinado, suspenso local ou livre profundo);
- conhecimento do perfil geológico e construtivo do poço, com destaque para posicionamento da seção filtrante e espessura de eventuais camadas confinantes;
- obtenção de dados de uma estação climatológica ou pluviômetro a uma distância conhecida inferior a 4 km do poço de monitoramento (de forma a se possibilitar a análise cruzada entre variação de nível e precipitação);
- obtenção de dados de chuva de pelo menos um ano anterior ao início do período, com disponibilização de dados potenciométricos.

Em relação à correlação dos dados de precipitação com os níveis, procedeu-se a uma análise de regressão linear por meio do método de “quadrados mínimos” para ajustar uma linha em um conjunto de observações, cuja correlação foi avaliada pelo p-valor, que depende diretamente da série de dados e representa uma medida quantitativa que auxilia o processo de tomada de decisão, pois se a hipótese nula (H_0) for verdadeira, não haverá correlação entre os dados. Concluiu-se, assim que os poços com níveis freáticos entre 15 e 50 m apresentam ótima correlação, com p-valor igual a $1,01 \times 10^{-7}$, bem inferior ao limite de p-valor $< 0,01$, que indica uma evidência muito forte contra a hipótese nula (H_0) (ARSHAM, 1988), onde, se a H_0 for verdadeira, a chance da variação aleatória será a única explicação para as diferenças amostrais.

Como os dados analisados são diários, foram discretizados os dados das chuvas e dos níveis pelo intervalo de tempo de 5, 10, 15 e 30 dias, não tendo sido observada correlação entre os dados dos poços com os níveis freáticos mais rasos que 15 m e com os mais profundos que 50 m (Figura 6.26).

Figura 6.26 – Perfis dos poços de monitoramento com níveis freáticos menores que 15 m.



Fonte: CPRM, 2012.

Na análise de correlação entre a precipitação com os níveis freáticos mais profundos que 50 m foram encontrados valores de p-valor entre 0,06 e 0,09, que, na mesma interpretação razoável (ARSHAM, 1988), indica a existência de uma evidência sugestiva contra H_0 , ou seja, os níveis dos poços indicativos do aquífero livre mais profundo apresentam apenas evidência sugestiva de correlação com a precipitação, o que se atribui a inferências dos aquíferos mais rasos durante a percolação da água.

Entretanto, os níveis freáticos mais rasos que 15 m não mostraram correlação com a precipitação (p -valor $> 0,36$), indicando que esses poços são relacionados à condição de artesianismo do aquífero semiconfinado.

Analisando-se os perfis construtivos dos poços da RIMAS (CPRM, 2012), concluiu-se que todos os poços com níveis freáticos mais rasos que 15 m, localizados na bacia do rio Grande, representam o aquífero semiconfinado, confirmando a existência desse subtipo de aquífero nesse local (GASPAR; CAMPOS, 2007).

6.4 Conclusões

Na área do SAU, o crescimento da área ocupada pela agricultura tem aumentado de forma exponencial nos últimos anos, com taxa de crescimento anual de 9%. Entretanto, essa expansão não ocorre em todo o perímetro uniformemente. As sub-bacias dos rios Corrente e Grande são as que apresentaram a maior expansão agrícola e a maior presença das áreas indicativas de irrigação por pivô central. Observou-se, também, desenvolvimento da silvicultura na região, com aumento na área de floresta plantada a partir de 1991, alcançando 325 km² em 2018, além de aumento exponencial na área urbana e presença da mineração sobre o SAU a partir de 1999 no município de Taguatinga (TO).

No sentido oposto, estão as áreas preservadas, que ocupam a maior parte da região com formação campestre, florestal e savânica, que estão diminuindo à taxa média de 1% ao ano, o que corresponde ao desmatamento de 537 km²/ano.

A avaliação das séries de precipitações mostrou uma tendência linear decrescente, comprovando que as chuvas dos últimos anos apontam para uma tendência de diminuição. Concomitantemente, a região experimentou crescimento exponencial da área irrigada, principalmente após o ano de 2010, com ocupação de 1.492 km² em 2017. Entretanto, 75% dessa área estão localizados na sub-bacia do rio Grande, principalmente nos municípios de Barreiras, Luís Eduardo Magalhães e São Desidério.

Como as estações têm áreas diferentes, foi observado um volume escoado médio igual a 0,6 mm/dia para o período analisado, com variação de 0,2 a 1 mm/dia. Desse volume escoado, 90% são compostos pelas vazões de base provenientes do SAU, atingindo constantes de recessão (α) da vazão de base inferiores a 0,047 e

duração média da estiagem de 184 dias (tempo de recessão), o que corrobora a ideia de que a resposta à recarga é muito lenta na área do SAU.

A análise das vazões demonstrou que o aumento do uso do solo nas bacias dos rios Corrente e Grande não impactou de forma significativa a vazão dos rios, indicando que a diminuição da chuva é a principal responsável pela redução da vazão nos rios, uma vez que as áreas desmatadas e destinadas ao uso agrícola foram as que apresentaram menor decaimento de vazão.

Tal observação decorre do fato de que os rios são alimentados, principalmente, pelo aquífero regional raso, cuja disponibilidade hídrica depende da variabilidade climática, uma vez que a recarga do Sistema Aquífero Urucua é exclusivamente oriunda de águas de chuvas que precipitam sobre o aquífero.

No que se refere aos poços, a variação da carga potenciométrica é muito restrita, variando de 0,5 m nas porções do aquífero confinado ou semiconfinado, até 2,2 m nas porções livres do sistema aquífero e que essa variação é devida à recarga natural.

A diminuição progressiva do nível freático ao longo do período de análise poderia ser interpretada como redução contínua da recarga; entretanto, esse comportamento é devido, provavelmente, à exploração do aquífero em áreas adjacentes, onde o cone de depressão de um poço de bombeamento altera o comportamento natural do nível potenciométrico do poço de monitoramento.

Em relação à correlação dos dados de precipitação com a variação dos níveis de poços, conclui-se que os níveis freáticos entre 15 e 50 m indicam a presença do aquífero regional livre, com forte correlação entre as variáveis (p -valor = $1,01 \times 10^{-7}$). Os níveis entre 15 e 50 m são indicadores do aquífero livre a confinado e apresentam apenas evidência sugestiva de correlação com a precipitação (p -valor entre 0,06 e 0,09). Os níveis mais rasos que 15 m não apresentaram correlação com a precipitação (p -valor > 0,36), indicando que esses poços mostram a condição de artesianismo do aquífero semiconfinado, onde a presença de níveis silicificados em profundidade causa atraso na infiltração, o que limita a correlação entre as chuvas e a recarga.

Conclui-se, assim, que a água subterrânea extraída a partir dos poços tubulares profundos, para irrigação, não está interferindo na vazão dos rios, embora, aparentemente, esteja interferindo na reserva não renovável (reserva permanente) do Sistema Aquífero Urucua em sua porção confinada.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS RIOS EFLUENTES DO SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA PARA ESCOAMENTO DO RIO SÃO FRANCISCO¹

CONTRIBUTION FROM THE URUCUIA AQUIFER SYSTEM EFFLUENT RIVERS TO THE SÃO FRANCISCO RIVER FLOW

Highlights

- First explanation about the flow reduction of the São Francisco river connected to the karst aquifers related to the Bambuí Group carbonate rocks.
- Baseflow determination of the Urucuia Aquifer System (UAS) to the São Francisco river contrasting to previous studies proposition.
- Analysis of flow contribution for each sub-basin based on hydrologic historic data.

Abstract

The São Francisco river basin is the fourth largest hydrographic region in Brazil. It is mostly located in the semiarid region, with a history of water deficits and irregularities in the rainfall regime, associated with great population growth and different water uses. The central part of this basin receives contributions from the Urucuia aquifer system – UAS, through the tributaries from the west of Bahia state and the north of Minas Gerais state, making this source essential for keeping the flow of the São Francisco river, especially during the period of rain recession, in years of drought. The present study aims to quantify and spatialize each tributary's effluent values that receive a contribution from the Urucuia aquifer, characterizing the maintenance of the São Francisco river flow controlled by the tributaries that are directly fed by the base flow of this aquifer. The study concludes that the medium São Francisco river receives an annual contribution from the UAS, corresponding to 31% of its total flow (811 m³/s). However, in the dry period in the basin, the effluent flow from the UAS contributes with 53% of the total São Francisco river flow. The analysis also showed that 20% of the flow observed in the São Francisco river middle basin is absorbed by the karst zone present in the region, from the Bom Jesus da Lapa and Barra fluviometric stations; the mean annual loss can reach up to 329 m³/s.

Keywords: Urucuia aquifer system. São Francisco river. karst aquifers.

¹ Os dados, os resultados de testes e os resultados parciais desta pesquisa estão disponíveis no Apêndice E (CD-ROM em anexo).

7.1 Introduction

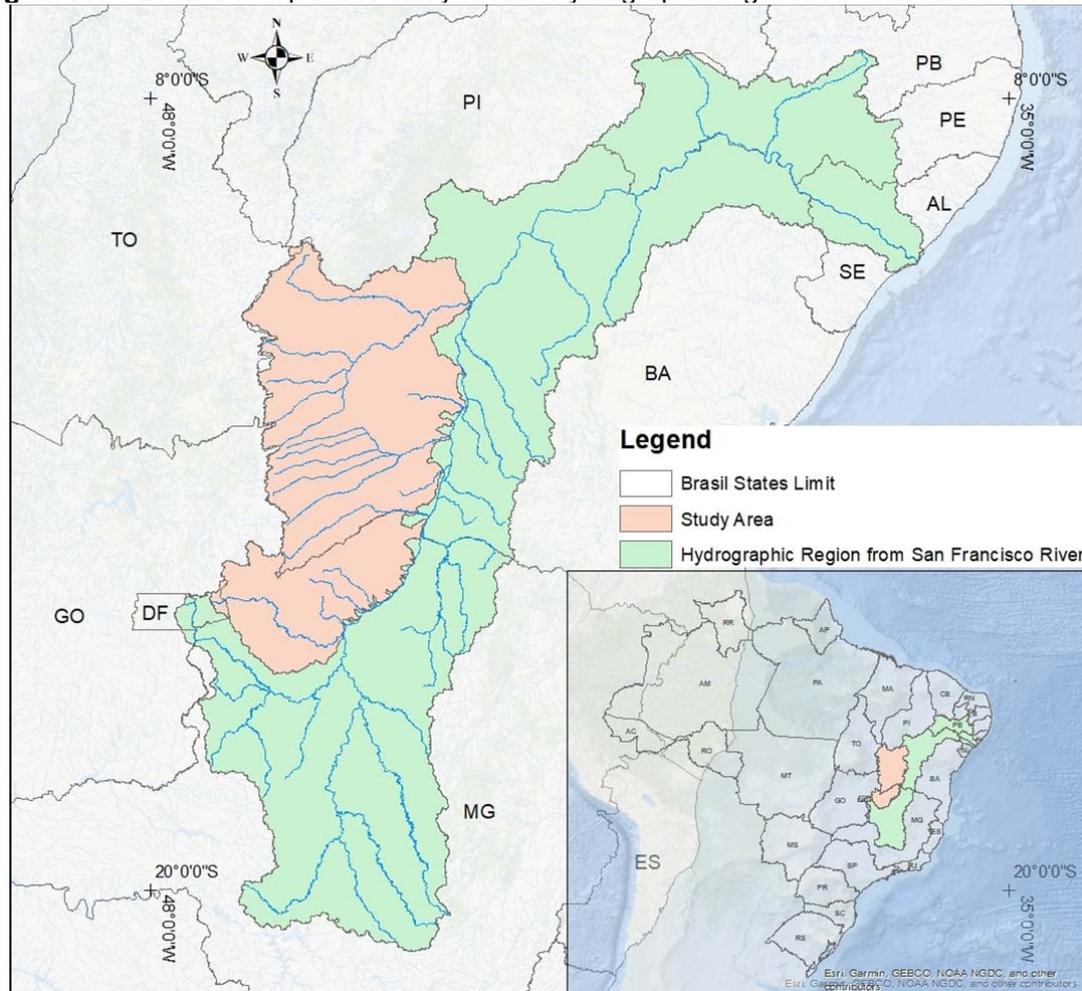
The São Francisco river basin is the fourth largest hydrographic region in Brazil, occupying 631,133 km² (figure 7.1), which corresponds to 7.4% of the national territory, mostly inserted in the semiarid region has a history of water deficits and irregularities in the rainfall regime. Associated with the unfavorable climate regime, this region has a great population growth and diversified uses of water, including power generation, irrigation, industry, navigation, fishing, and, mainly, human supply (rural and urban), which results in water users' conflicts (O'Hanley *et al.*, 2020).

Geologically, the area is represented by part of the São Francisco Craton and its phanerozoic coverage. The substrate includes granite-gneiss crystalline rocks, volcano-sedimentary sequences, carbonate, and pelitic rocks. This set of Proterozoic rocks is overlaid by the Sanfranciscana Basin, which corresponds to the Phanerozoic coverage the São Francisco Craton, which consists mainly of continental sedimentary rocks, where the following units represent the stratigraphy: Santa Fé Group (Permo-Carboniferous), Areado Group (Lower Cretaceous), Mata da Corda Group (Upper Cretaceous) and Urucuia Group (Upper Cretaceous). The Chapadão Formation (Cenozoic), corresponds to eluvial, colluvial or alluvial recent, unconsolidated sandy (Campos and Dardenne, 1997).

Along the Middle São Francisco basin, its main tributaries and in the high plateaus areas there are high hydraulic conductivity materials, represented by alluvial unconsolidated deposits of Quaternary age, with medium to fine sand and Cenozoic Aeolian sediments. However, in most Upper São Francisco basin there are rocks and soils covers with medium to low hydraulic conductivity.

In the region of western Bahia and northwest Minas Gerais states, between the São Francisco and Paracatu rivers (study area – figure 7.1), there are materials with moderate to high hydraulic conductivity due to the occurrence of medium to fine sandy and conglomerate sediments with intercalations of silt and mud, which are related to extensive plateaus, usually of Cretaceous age. Some areas with medium to low hydraulic conductivity can be observed irregularly distributed throughout the region, except in the São Francisco river valley (BRASIL, 2006).

Figure 7.1 – Location map of the study area in hydrographic region from San Francisco river.



However, several studies have pointed out that the contribution of the Urucua aquifer system (UAS), located in the region of Bahia western, is fundamental for maintaining the flow of the São Francisco river, especially during the period of rain recession, in the years of drought. Many authors propose that the contribution of UAS varies between 80-90% of the total flow of the rivers of the western Bahia region, which are tributaries that direct feed the São Francisco river (Barbosa *et al.*, 2014; Cunha, 2017; Engelbrecht and Chang, 2015; Gaspar, Campos and Cadamuro, 2007; Guimarães, Costa and Campos, 2009; Marques *et al.*, 2020; Schuster *et al.*, 2002).

The study presented by the National Water and Basic Sanitation Agency of Brazil, where the determination of the baseflow was found using the HYSEP program (Sloto and Crouse, 1996) determined that the total estimated contribution to the hydrographic regions surrounding the UAS is approximately 991.55 m³/s, and the

São Francisco river basin receives an estimated contribution of about 730 m³/s, with the average contribution being 30% of the total flow, but varying throughout the year. Between December and March/April, it varies between 10% and 50%, and in the other months, this value can reach 80 or 90%, in September or October, increasing the importance of the contribution of the UAS to flow of the São Francisco river (ANA, 2017b).

The same values were found by Silva and Chang (2018) when analyzing the estimate of the regional flow that, according to these authors, is responsible for the discharge of water in the form of baseflow to the São Francisco (731 m³/s), Tocantins (215 m³/s) and Parnaíba (45 m³/s) rivers, which moves from west to east, following the direction of the runoff.

Another study using the flow data series of five fluviometric stations in the Rio Grande basin, from 1977 to 2013, and the method of Pettyjohn and Henning (Sloto and Crouse, 1996), concluded that the baseflow corresponds to the main component of river flow, contributing with 81.75 to 93.06%, and there is a correlation between the decrease in the base flow and the reduce in precipitation rates. They also concluded that the decreasing basal flow rate (0.75 – 3.04%/year) is more severe than the reduction in the precipitation rate (0.07 – 0.88%/year), indicating that other factors (e.g., overexploitation of the aquifer) contribute to the decrease in the baseflow, indicates overexploitation of the aquifer, that may cause a significant decrease in the flow of the rivers downstream, impacting the flow of the São Francisco river (Gonçalves, Engelbrecht and Chang, 2016).

The same authors concluded that the average base flow of the UAS is 200 mm/year after applying the Pettyjohn and Henning recursive digital filters in the flow series of 45 fluviometric stations distributed throughout the basin. They also registered that the São Francisco river biggest contribution was in 1980, with 280 mm/year, and that is a continuous drop pattern, adding a decrease of 49% (Gonçalves, Engelbrecht and Chang, 2018).

Several studies have shown that the Urucuia aquifer system baseflow is important to keep the São Francisco river discharge, but there are still outstanding questions about this topic.

In 2018, a study analyzed information from 45 fluviometric stations distributed over the sub-basins of the Grande, Corrente, Carinhanha, and Pandeiros rivers to assess the temporal behavior and estimate the contribution of the Urucuia aquifer

system in all the tax sub-basins of the São Francisco river by determining the baseflow using the Pettyjonh and Henning recursive digital filters (FDR) method (Sloto and Crouse, 1996). It concluded that the historical average of the base flow from the UAS to the São Francisco river amounts to approximately 200 mm/year (570 m³/s) and represents, on average, between 89% and 95% of the total flow of rivers. However, after 1980, the base flow over the entire length of the aquifer presents a pattern of continuous fall, totaling a 49% decrease (390 m³/s) of contribution to the São Francisco river (Gonçalves, Engelbrecht and Chang, 2018).

The hydrological characterization of the Geological Survey of Brazil – CPRM presents an average annual flow volume in the UAS is of the order of 25km³, which corresponds to an average annual flow of 792.7 m³/s, which is equal to 29% flow (2,700 m³/s) that reaches the Sobradinho reservoir (CPRM, 2019).

However, it is essential to know the contribution of the flow of effluent rivers from the UAS along the stretch of the middle São Francisco river and the impact of the base flow of the aquifer system in maintaining the flow of this critical Brazilian river, seeking to provide more accurate and spatially distributed information. This assists in the decision-making of water resources management, both in tributaries and in the São Francisco river's main channel. Thus, the objectives of the present study include:

- Determination of how the aquifer feeds the rivers of western Bahia state and how these streams contribute to the São Francisco river.
- Determination of the importance of each effluent tributary to the whole São Francisco basin.
- Explanation for the significant reductions of the São Francisco river flow observed in selected stations at the São Francisco river.

7.2 Material and Methods

In the UAS region, 23 hydrographic sub-basins were defined whose rivers are tributaries of the São Francisco river. However, the sub-basin areas transcend the aquifer area, as can be seen in Figure 7.2.

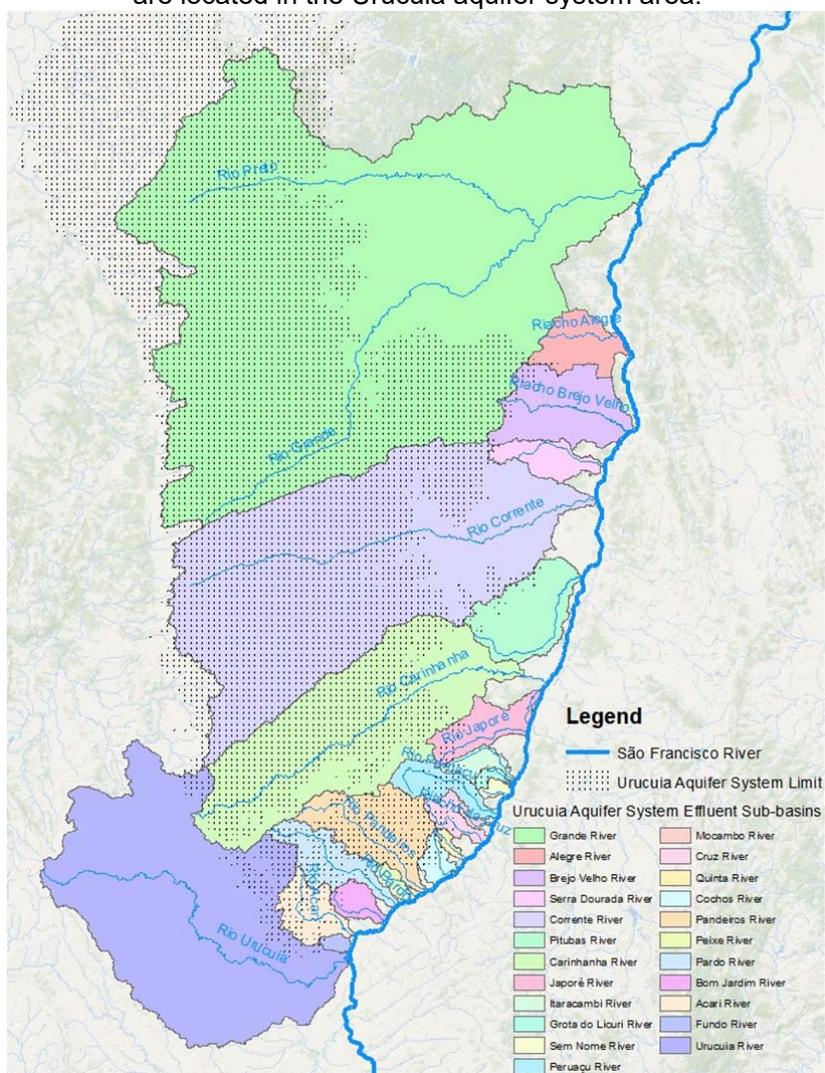
The Rio Grande is the largest sub-basin, and includes the drainage areas of two large rivers inserted in the Urucuia aquifer area: the Grande river itself and the Preto river, its main tributary. It includes the Barreiras and Luís Eduardo Magalhães

counties, which were the first to expand the agricultural area and allocate between 44 and 58% of the area to plantation.

In the same region, the Corrente river basin is located, which is the second-largest sub-basin, with an area equal to half the area of the Grande river sub-basin. However, since the agricultural expansion in this region just begun in 1993; agricultural use comprises 22% of its area.

In the 23 delimited sub-basins, 68 fluviometric stations with flow data are placed in and distributed as follows: 29 stations in the Grande river (sub-basin 46), 16 in the Corrente river (sub-basin 45), 12 in the Urucuia river (sub-basin 43), 10 in the Carinhanha river (sub-basin 45), 3 in the Pandeiros river (sub-basin 44) and 1 in the Japoré river (sub-basin 44).

Figure 7.2 – Map of the drainage areas of the São Francisco river tributaries, whose sources are located in the Urucuia aquifer system area.



These stations were classified according to the available data series: **A** for time series over 40 years or older; **B** for time series from 30 to 39 years; **C** for time series from 10 to 29 years; and **D** for time series of 5 to 9 years. Time series shorter than five years, are classified as **E**, and were not pre-selected for the study, as they are short to characterizing long-term hydrological behavior. Figure 7.3 illustrates the statistics of the available fluviometric data from the pre-selected stations shows that 21% of stations are classified as **A**, 24% are class **B**, 35% class **C**, 16% class **D**, and 4% were classified as **E**. Those classified as **D** were separated to be used in the simulations validation stages, as they have short data series. Time series over 10 years were pre-selected to the basin characterization analysis (Table 7.1).

Figure 7.3 – Statistics on the fluviometric data availability.

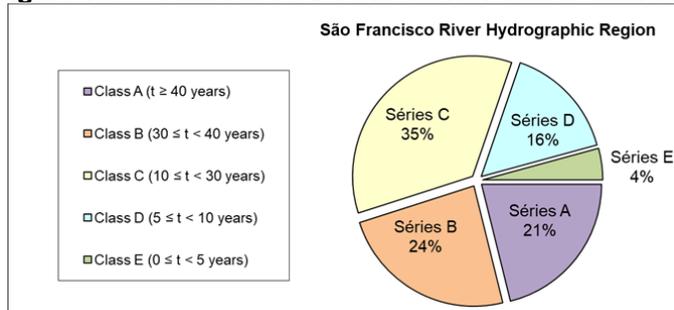


Table 7.1 – Information on pre-selected stations by a tributary of the hydrographic regions.

| Hydrographic Regions | Affluent | Excluded Stations Number (Class: E) | Pre-Selected Stations Number (Class: A, B, C) | Stations Selected Number (Class: D) |
|----------------------|------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| São Francisco River | Grande river | 2 | 19 | 8 |
| | Corrente river | - | 15 | 1 |
| | Carinhanha river | - | 9 | 1 |
| | Japoré river | - | 1 | - |
| | Urucuia river | 1 | 10 | 1 |
| | Pandeiros river | 0 | 3 | 0 |

Therefore, based on the previous feasibility analysis, the historical series of stations belonging to the river basins or river drainage areas were pre-selected: Grande (Sub-basin 46), Corrente (Sub-basin 45), Urucuia (Sub-basin) 43), Carinhanha (Sub-basin 45), Pandeiros (Sub-basin 44) and Japoré (Sub-basin 44).

However, after analysis of the rain data, the period from September 1973 to August 2006 was defined for the analysis of the water balance and, also considering the location of the stations, if over the Urucuia aquifer or if in the discharge area, 26

stations were separated whose series data can be applied in the analysis (Figure 7.4 and Table 7.2).

Time series of daily mean flows of thirteen fluviometric stations installed on the channel of the São Francisco river were also analyzed to evaluate the flow continuity and the water supply from the UAS. Of the analyzed stations, one is installed upstream from the Urucuia river confluence, another downstream from the Rio Grande union with the São Francisco river, and the others between these two convergences. The evaluated stations includes: São Romão (43200000), São Francisco (44200000), Pedras da Maria da Cruz (44290002), Januária (44300000), Fazenda Canadá (44400000), Manga (44500000), Carinhanha (45298000), Bom Jesus da Lapa (45480000), Gameleira (46035000), Paratinga (46105000), Ibotirama (46150000), Morpará (46360000) and Barra (46998000). The characteristics of these stations are shown in Table 7.3.

Figure 7.4 – Location map of the fluviometric stations

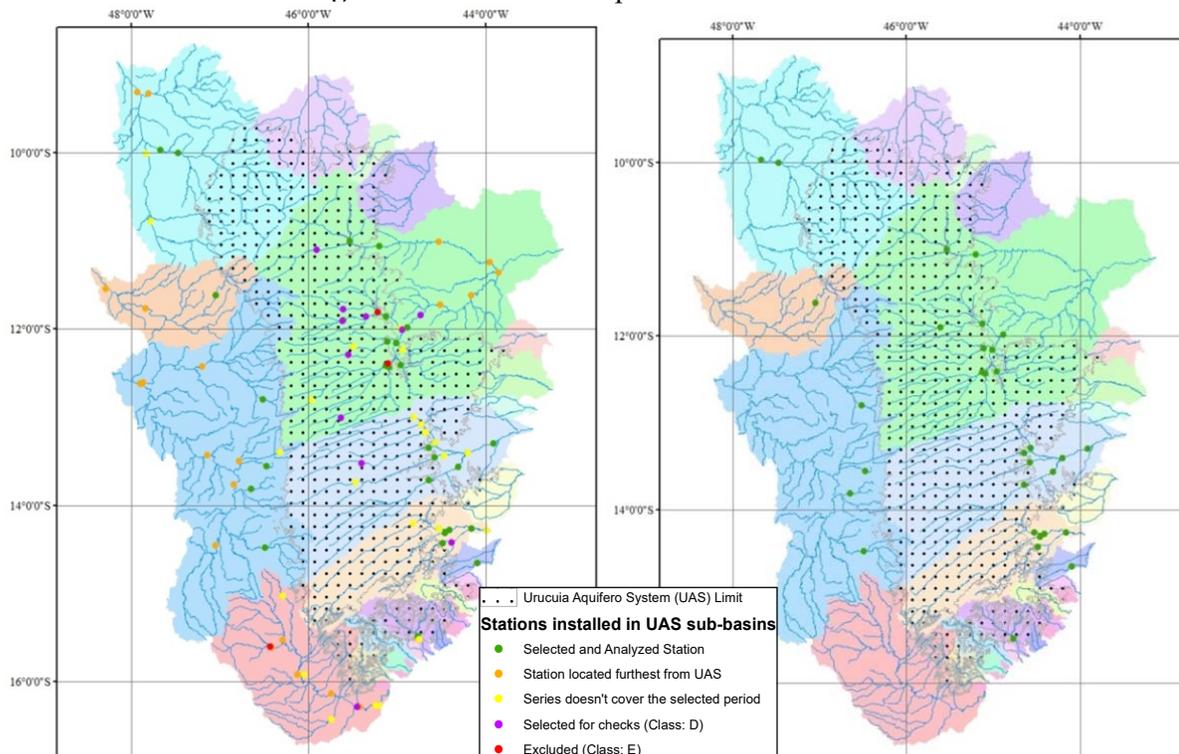


Table 7.2 – Daily mean flow (m³/s) average, minimum, maximum, and drainage areas of selected stations.

| Sub-Basin | Station Code | Station Name | Area (km ²) | Flow (m ³ /s) | | |
|------------------|--------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|---------|---------|
| | | | | Average | Maximum | Minimum |
| Urucuia river | 43980002 | Barra do Escudo | 24.600 | 241,3 | 1.917,4 | 9,69 |
| Pandeiros river | 44250000 | Usina Pandeiros Montante | 3.230 | 23,4 | 147,0 | 8,1 |
| Japoré river | 44540000 | Fazenda Bom Retiro | 624 | 2,0 | 39,2 | 0,4 |
| Carinhanha river | 45131000 | São Gonçalo | 6.020 | 68,0 | 235,1 | 34,2 |
| | 45170001 | Fazenda Porto Alegre | 5.850 | 61,8 | 204,9 | 38,9 |
| | 45210000 | Lagoa das Pedras | 12.600 | 131,7 | 425,5 | 71,1 |
| | 45220000 | Capitânea | 2.380 | 12,4 | 76,7 | 2,9 |
| | 45260000 | Juvenília | 16.300 | 145,1 | 698,7 | 73,2 |
| Corrente river | 45590000 | Correntina | 3.900 | 32,6 | 109,7 | 21,1 |
| | 45740001 | Mocambo | 7.950 | 41,7 | 200,6 | 20,4 |
| | 45770000 | Arrojado | 5.540 | 58,8 | 218,5 | 38,5 |
| | 45840000 | Gatos | 7.130 | 80,7 | 238,3 | 50,1 |
| | 45880000 | Colônia do Formoso | 9.550 | 83,2 | 312,1 | 51,3 |
| | 45910001 | Santa Maria da Vitória | 29.600 | 212,1 | 823,8 | 122,5 |
| | 45960001 | Porto Novo | 31.000 | 216,5 | 816,2 | 125,7 |
| Grande river | 46415000 | Sítio Grande | 4.950 | 33,0 | 104,0 | 4,9 |
| | 46455000 | Derocal | 6.350 | 50,4 | 173,2 | 25,9 |
| | 46490000 | Fazenda Coqueiro | 4.470 | 6,6 | 68,8 | 1,1 |
| | 46543000 | Fazenda Redenção | 5.380 | 50,2 | 138,6 | 21,8 |
| | 46550000 | Barreiras | 24.400 | 89,0 | 335,0 | 24,6 |
| | 46570000 | Ponte Serafim - Montante | 2.710 | 14,4 | 54,0 | 3,9 |
| | 46590000 | Nova Vida - Montante | 7.480 | 51,6 | 168,8 | 31,4 |
| | 46610000 | São Sebastião | 33.100 | 191,3 | 652,0 | 106,8 |
| | 46770000 | Fazenda Bom Jardim* | 6.930 | 35,1 | 66,6 | 23,2 |
| | 46790000 | Formosa do Rio Preto* | 14.300 | 101,3 | 308,0 | 65,2 |
| | 46902000 | Boqueirão | 65.900 | 265,0 | 477 | 184 |

Note: The stations with * are in Preto river's sub-basin, a tributary of Grande river.

Table 7.3 – Average long-term flow, low-flow period (quarterly), drainage area, and length of the river stretch upstream the stations installed in the São Francisco river channel and which were used in this study.

| Station Code | Station Name | Area (Km ²) | Section Length Upstream of the Station (Km) | Average flow (m ³ /s) | Low-flow Period (m ³ /s) | Geographic Coordinates | |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|---|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------|----------|
| | | | | | | X | Y |
| 43200000 | São Romão | 154.000 | 280,601* | 1.586 | 777,2 | -45,0645 | -16,3726 |
| 44200000 | São Francisco | 184.000 | 65,10 | 1.908 | 835,8 | -44,8743 | -15,9481 |
| 44290002 | Pedras de Maria da Cruz | 194.000 | 68,54 | 2.035 | - | -44,4028 | -15,5960 |
| 44300000 | Januária | 195.000 | 13,51 | 2.168 | 822,5 | -44,3257 | -15,5055 |
| 44400000 | Fazenda Canadá | 200.000 | 70,31 | 1.834 | 838,1 | -44,0179 | -15,0168 |
| 44500000 | Manga | 202.000 | 33,33 | 1.952 | - | -43,9305 | -14,7570 |
| 45298000 | Carinhanha | 254.000 | 56,29 | 2.206 | 996,1 | -43,7613 | -14,3036 |
| 45480000 | Bom Jesus da Lapa | 271.000 | 134,79 | 2.125 | 1149,4 | -43,4351 | -13,2572 |
| 46035000 | Gameleira | 309.000 | 49,94 | 2.435 | 1299,6 | -43,3795 | -12,8695 |
| 46105000 | Paratinga | 314.000 | 27,94 | 2.414 | 1288,2 | -43,2269 | -12,6914 |
| 46150000 | Ibotirama | 323.000 | 64,65 | 2.521 | 1299,2 | -43,2304 | -12,1799 |
| 46360000 | Morpará | 345.000 | 84,45 | 2.419 | 1252,1 | -43,2964 | -11,5531 |
| 46998000 | Barra | 425.000 | 59,09 | 2.652 | 1262,8 | -43,1303 | -11,0919 |
| Sobradinho Reservoir | | | 381,814 | - | - | -40,8333 | -9,4167 |

* Distance between the Três Marias Reservoir (-45.2836; -18.2006) and São Romão station.

The stations data were spatialized with the aid of geoprocessing tools, using the ArcGis software, and for each station, a database was generated with the series of daily, monthly, and annual flows, which was coupled with the spatialized data for analysis of continuity to flow rates. We consider the flow period observed in each station during the continuity analysis, always analyzing the same time window, with equal periods, between the upstream and downstream stations (Table 7.4).

Table 7.4 – Flow rate observed at each station installed on the São Francisco river and analyzed in this work.

| Station Code | Station Name | Period (years) | | | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|--|
| | | 1920-1929 | 1930-1939 | 1940-1949 | 1950-1959 | 1960-1969 | 1970-1979 | 1980-1989 | 1990-1999 | 2000-2009 | 2010-2019 | | |
| 43200000 | São Romão | | | | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| 44200000 | São Francisco | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| 44290002 | Pedra de Maria da Cruz | | | | | | X | X | X | X | X | X | |
| 44300000 | Januaria | | X | X | X | X | | | | | | | |
| 44400000 | Fazenda Canada | | | | | | X | X | | | | | |
| 44500000 | Manga | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| 45298000 | Carinhanha | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| 45480000 | Bom Jesus da Lapa | | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| 46035000 | Gameleira | | | | | X | X | X | X | X | X | X | |
| 46105000 | Paratinga | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| 46150000 | Ibotirama | | | | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| 46360000 | Morpará | | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| 46998000 | Barra | | X | X | X | X | | | | | | | |

After the continuity analysis, the data were compared with the geology from the Brazilian geological map (CPRM, 2004), on a 1:1,000,000 scale to evaluate the regional geological context and compare to the behavior of the discharge river flow, and explain the increasing water rate or eventually the discharge decrease.

To analyze the base flow, we used an adaptation proposal in the methodology of the recursive digital filter developed by Lyne and Hollick (1979), based on the analysis and signal processing (Lynn, 1973) and used by several authors (Arnold *et al.*, 1995; Arnold and Allen, 1999); Szilagyi (2003, 2004).

The recursive digital filter method consists of applying mathematical procedures to digital data. In this case, the recursive moving average of $N = 2$ applied to the runoff data, that is, the fast runoff generated by the part of the precipitation that does not infiltrate the soil it evaporates. However, the authors considered that a percentage of the surface flow propagated over time, equal to the

parameter β . They then wrote the difference in surface flow as a function of the total flow of the river, considering this same percentage propagated for the total flow. Thus, the digital recursive filter equation is:

$$q_t = \beta \cdot q_{t-1} + \frac{(1+\beta)}{2} \cdot (Q_t - Q_{t-1}) \dots\dots\dots (I) \text{ and}$$

$$Qb_t = Q_t - q_t \dots\dots\dots (II)$$

Where: Qb_t is the base flow at time t , q_{t-1} is the surface flow at the previous time ($t - 1$), Q_t is the flow of the river at time t , Q_{t-1} is the flow of the river at the time above ($t - 1$) and β is the filter constant, which must have a value between 0.75 and 0.9 (Lyne and Hollick, 1979).

This digital filter, analogous to filtering high-frequency signals, has no real physical basis, but it is objective and reproducible. The same principle applied in the BaseFlow program (Arnold *et al.*, 1995), considered for the determination of the base flow from the UAA, where the value of β is fixed, equal to 0.925 (Nathan and McMahon 1990; Arnold *et al.*, 1995), and the filter passes through the flow data three times (forward, backward and forward).

However, the daily base flow (QB), in m^3/s , was defined as being equal to the average between the base flows, at the same time t , but obtained in the first and second pass of the filter. Based on the study by Arnold and Allen (1999), which concluded that the fraction of water yield contributed by the base flow, in general, should be between the values found in the first and second passages.

$$QB_t = \frac{Qb_{t(1^{st}passage)} + Qb_{t(2^{nd}passage)}}{2} \dots\dots\dots (III)$$

In this way, each analyzed station's daily base flow was defined, located in the effluent rivers of the UAS, as well as in the stations installed on the São Francisco river channel.

7.3 Results and Data Analysis

7.3.1 Analysis of effluent flow by sub-basin

7.3.1.1 Urucuia river Sub-basin

The Urucuia river is the first tributary, which receives contribution from the Urucuia aquifer, to the São Francisco river flow, but despite having an area of 25,315 km², only 7.97% is over the aquifer (2,019 km²). However, this river is responsible for the average long-term flow equal to 196.6 m³/s, where 68% corresponds to the baseflow from the UAS (equivalent to 133.9 m³/s), calculated based on the recursive digital filter method.

In this sub-basin, the fluviometric station installed on the Urucuia river, closest to the São Francisco river channel, is Barra do Escudo (code: 43980002), where annual flows lower than the historical average have been observed since 2011, with the lowest values observed in the hydrological years of 2015/2016 (71.01 m³/s) and 2016/2017 (65.61 m³/s). In this basin, the recession time is around 37 days, contrasting with the period observed for the stations located over the Urucuia aquifer system (202 days on average).

This sub-basin is located on the “Cenozoic Formations” hydrogeological domain, with great contributions from colluviums coming from the Urucuia aquifer, but its flow rate presents a different behavior, with greater contribution from runoff, around 32%.

7.3.1.2 Small Sub-basins located between the entrance of the Urucuia and Carinhanha rivers

Between the Urucuia and the Carinhanha rivers convergence with the São Francisco river there are the contribution of fifteen small sub-basins on its left bank, which has a total area of less than 16 km² but receives contribution from the Urucuia aquifer. Data from these small sub-basins are shown in Table 7.5.

Fluviometric stations Usina Pandeiros (code: 44250000) and Fazenda Bom Retiro (code: 44540000) are installed in the area, presented a decrease in annual flow of -25% and -21%, respectively, concerning the historical average observed, when analyzed the period from 1995 to 2006.

Table 7.5 – Data determined for fifteen small sub-basins on the São Francisco river left bank, which receive contributions from the Urucuia aquifer system.

| Sub-Basin | Area (km ²) | UAS Area (km ²) | Average Long-Term Flow (m ³ /s) | Baseflow (m ³ /s) |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| Fundo river | 219 | 12 | 1.5 | 0.1 |
| Acari river | 1.662 | 911 | 11.5 | 6.7 |
| Bom Jardim river | 770 | 102 | 5.3 | 0.8 |
| Pardo river | 2.205 | 1.227 | 15.3 | 9.1 |
| Peixe river | 376 | 7 | 2.6 | 0.1 |
| Pandeiros river | 3.942 | 2.759 | 26.7 | 20.3 |
| Cochos river | 573 | 221 | 4.0 | 1.6 |
| Quinta river | 195 | 71 | 1.4 | 0.5 |
| Cruz river | 755 | 329 | 5.2 | 2.4 |
| Mocambo river | 151 | 27 | 1.0 | 0.2 |
| Peruaçu river | 1.435 | 380 | 10.0 | 2.8 |
| Sem Nome river | 218 | 30 | 1.5 | 0.2 |
| Grota do Licuri river | 211 | 122 | 1.5 | 0.9 |
| Itaracambi river | 685 | 203 | 4.8 | 1.5 |
| Japoré river | 1.891 | 307 | 5.9 | 2.8 |
| Total | 15.288 | 6.708 | 98.3 | 50.1 |

The average long-term flow found for the Pandeiros river was 26.7 m³/s and the base flow was 20.3 m³/s, slightly higher than the 18 m³/s flow found by Gonçalves, Engelbrecht and Chang (2018).

7.3.1.3 Carinhanha river Sub-basin

The Carinhanha river Sub-basin is the third-largest sub-basin with an area over the UAS (69%), and the fluviometric stations installed in the Carinhanha river basin also showed an average decrease of -18% in the annual flow about the historical value (from 1994 to 2006), which is similar to the decrease presented by the flow series of the Usina Pandeiros and Fazenda Bom Retiro stations. The stations analyzed in this sub-basin included: São Gonçalo (45131000), Fazenda Porto Alegre (45170001), Lagoa das Pedras (45210000), Capitânea (45220000), and Juvenília (45260000).

The Carinhanha river contribution to the flow of the São Francisco river is 144 m³/s (average long-term flow), with 134.7 m³/s constituting the baseflow; that is, 94% of the flow that reaches the São Francisco through the Carinhanha river are from the Urucuia aquifer. An inferior value was found by Gonçalves, Engelbrecht and Chang (2018), around 120 m³/s.

7.3.1.4 Pitubas river Sub-basin

Located between the Carinhanha and Corrente rivers exits, the Pitubas river sub-basin has a total area of only 3,702 km², of which 581 km² are over the UAS. There are no stations installed, but the analysis showed that it flows into the São Francisco river, an average long-term flow of 31.7 m³/s, but probably only 8% (2.6 m³/s) of this flow comes from the UAS since the area of the aquifer in the basin is very restricted.

7.3.1.5 Corrente river sub-basin

The Corrente river sub-basin occupies an area of 34,300 km², where 78.3% is located over the UAS.

In this sub-basin, seven fluviometric stations were analyzed, whose flow rates decreased by 13% in the average annual flow compared to the historical value, from 1995 to 2006. The stations whose series were analyzed include: Correntina (45590000), Mocambo (45740001), Arrojado (45770000), Gatos (45840000), Colônia do Formoso (45880000), Santa Maria da Vitória (45910001), and Porto Novo (45960001).

The average long-term flow of the Corrente river that reaches the São Francisco river is equal to 237.9 m³/s, consisting of a baseflow estimated as 205.7 m³/s, which are higher values than the proposed by Gonçalves, Engelbrecht and Chang (2018), around 190 m³/s.

7.3.1.6 Small sub-basins located between the Corrente and Grande rivers convergence

The sub-basins of the Serra Dourada, Brejo Velho, and Alegre rivers are located on the left bank of the São Francisco river, after the convergence with the Corrente river, and receive a contribution of only 0.5% of the UAS area (668 km²). These associated sub-basins contribute with a baseflow of 41.56 m³/s, approximately 76% of the total average flow released to São Francisco (55 m³/s), with 10.1 m³/s being the contribution of the Serra Dourada river; 30.7 m³/s of the Brejo Velho river, and 14.1 m³/s is the flow of the Alegre river.

7.3.1.7 Grande river sub-basin

The Grande river sub-basin has a total area of 77,045 km², almost 60% over the Urucuia aquifer (45,785 km²). It is also the best-known region, where the Barreiras and Luís Eduardo Magalhães counties are located, and with the largest area of agricultural use and the largest irrigated perimeter. The Grande river spring and its first tributaries occupy an area of 3,193.9 km² over the UAS.

However, its main tributary is the Preto river, which also has its source over the UAS, but its confluence with the Grande river only occurs 251 km after its descent from the plateau marks the eastern limit of the aquifer. The area of the Preto river sub-basin over the UAS is 1,573 km².

Eleven fluviometric stations were analyzed in this basin: Sítio Grande (46415000), Derocal (46455000), Fazenda Coqueiro (46490000), Fazenda Redenção (46543000), Barreiras (46550000), Ponte Serafim – Amount (46570000), Nova Vida – Amount (46590000), São Sebastião (46610000), Fazenda Bom Jardim (46770000), Formosa do Rio Preto (46790000) and Boqueirão (46902000). The flow series showed that there is continuity and that the average annual flow that reaches the São Francisco river is 295.8 m³/s, with 84% being the base flow from the UAS (248.7 m³/s).

The average flow found for the Grande river was slightly higher than the 240 m³/s considered by Gonçalves, Engelbrecht and Chang (2018). Gonçalves, Engelbrecht and Chang (2018) carried out the analysis of the base discharges, the authors considered the increase of the observed base flow of 170 m³/s at Fazenda Macambira station (46675000) and 240 m³/s at Boqueirão station (46902000) from water discharge of the karst aquifer present in this region. However, the authors did not consider the Preto river's affluent flow, which flows between the Fazenda Macambira and Boqueirão stations. Furthermore, when considering flow continuity analysis in every channel, it is observed that the entire Grande river effluent base flow comes exclusively from UAS.

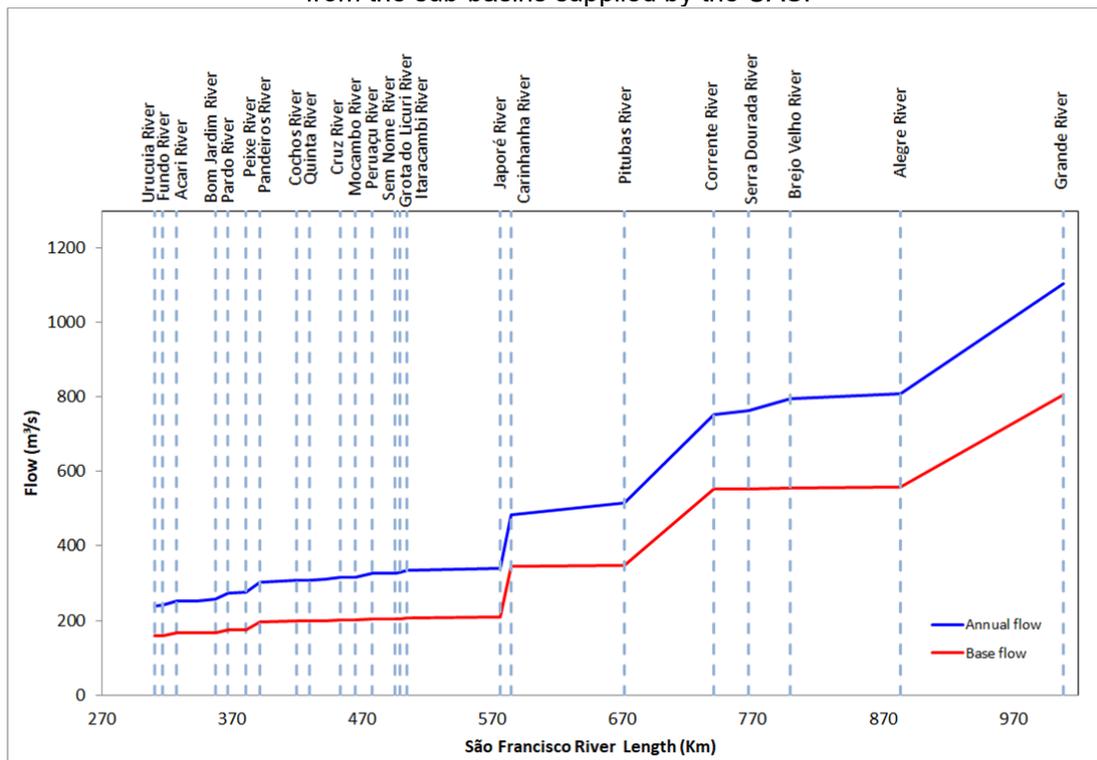
7.3.2 Analysis of the contribution of the Urucuia aquifer system to the São Francisco river

The monthly and annual data of discharge generated for each sub-basin were analyzed. It was observed that the flow that reaches the São Francisco river, on annual average, the Urucuia river is responsible for 22% (240 m³/s), the Carinhanha

river 13% (144 m³/s), the Corrente river contributes with 22% (238 m³/s), and the Grande river flows 27% (296 m³/s), the remaining 17% are contributions from the 21 small sub-basins (186.6 m³/s). In other words, the São Francisco river receives an average annual flow of 1,104 m³/s from its contributors, but 73% of this is made up of the effluent base flow from the Urucuia aquifer, around 811 m³/s (Figure 7.5). This results area higher than the flow (730m³/s) found by other authors (ANA, 2017b; Silva and Chang, 2018).

However, analyzing and adding the discharge from the basins located on the left margin of São Francisco river (located in north of Minas Gerais and west Bahia states), it is observed 1,104 m³/s from the annual contribution, which corresponds to 42% of the São Francisco river flow. If just the effluent from the Urucuia aquifer system is separated, it results in a flow equal to 811 m³/s, that is, the Urucuia aquifer system corresponds to 36% of the baseflow and 31% of the total annual flow from the São Francisco river. These assessments are very similar to those purposed by the Brazilian Geological Survey study (25 km³/ano = 792,74 m³/s – 30%), applying the Eckhardt filter (CPRM, 2019).

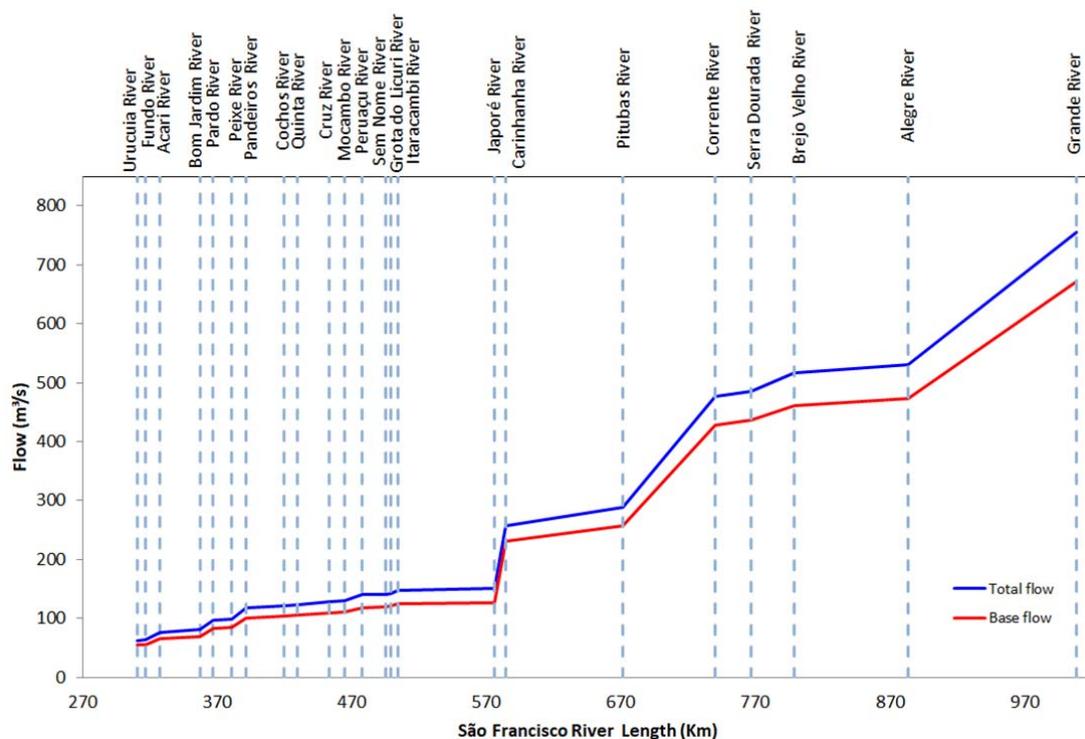
Figure 7.5 – Graphs of the average annual flow of contribution to the São Francisco river from the sub-basins supplied by the UAS.



The low-flow period in the middle São Francisco basin, which occurs in July, August, and September, was also evaluated, according to the monthly average hydrograph of the thirteen fluviometric stations installed in its channel: São Romão (43200000), São Francisco (44200000), Pedras da Maria da Cruz (44290002), Januária (44300000), Fazenda Canadá (44400000), Manga (44500000), Carinhanha (45298000), Bom Jesus da Lapa (45480000), Gameleira (46035000), Paratinga (46105000), Ibotirama (46150000), Morpará (46360000) and Barra (46998000). Therefore, the São Francisco river low-flow period occurs with a gap of one month concerning the drought period of the UAS (June, July, and August).

In the analysis of the São Francisco low-flow period, it is observed that the evaluated rivers contribute with a flow of 754.7 m³/s, 671 m³/s coming from the effluent flow from the Urucua aquifer (Figure 7.6). This corresponds to 55% of the baseflow and 53% of the total annual flow of the São Francisco river.

Figure 7.6 – Graphs of dry season's average flow from rivers with discharge controlled by Urucua aquifer system.



7.3.3 Flow continuity analysis on the São Francisco river channel

Analyzing the continuity of these flows with those observed in the fluviometric stations installed along the São Francisco river, it is observed between the Januária (44300000) and Fazenda Canadá (44400000) stations, the flow of the São Francisco river decreases. This fact is observed both in the monthly and annual series, starting in 1934, when the Januária and Manga stations (44500000) were installed upstream from Fazenda Canadá (Figure 7.7). A decrease in the flow also occurs at the Paratinga (46105000) and Morpará (46360000) stations. However, due to the series of available flows, it is possible to follow the decrease after the Januária station from the 1930s onwards, both in annual and monthly flows. Nevertheless, the decrease in Paratinga and Morpará is only evident from the 1970s, as seen in the graph of average flow rates per decade (Figure 7.8).

Figure 7.7 – Average long-term flows and base flow, observed in 13 stations installed in the middle São Francisco river channel.

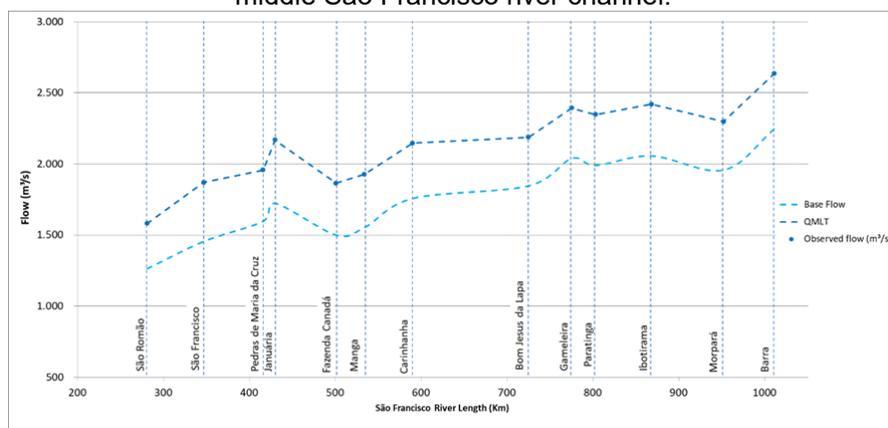
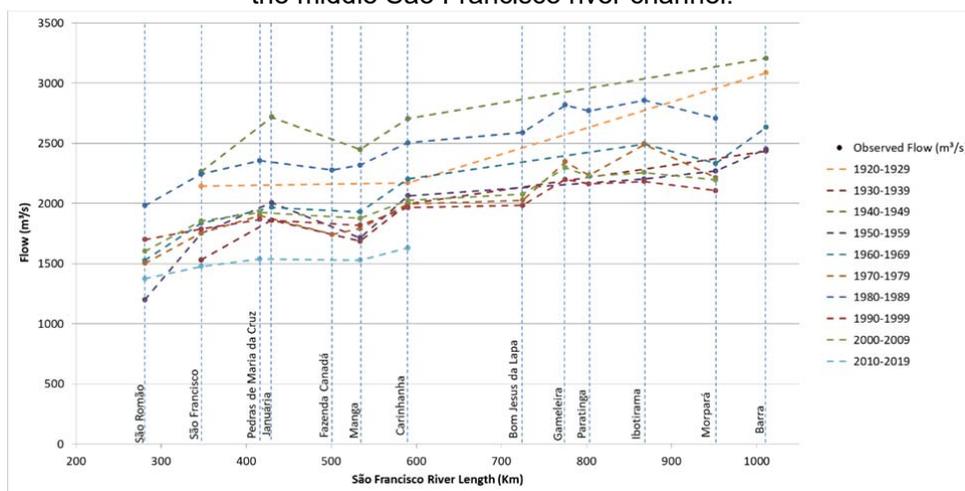


Figure 7.8 – Average long-term flows, defined for 10-year periods for 13 stations installed in the middle São Francisco river channel.



In both cases described above, the decrease occurs in both the total and base flows. However, this observation is different from what happens at the Bom Jesus da Lapa fluviometric station (45480000), where the decrease is observed only in the total flow of the São Francisco river, and the baseflow is preserved.

The decrease between Januária (44300000) and Fazenda Canadá (44400000) stations is approximately 224 m³/s, while the average losses in Paratinga and Morpará are, respectively, 67 m³/s and 144 m³/s.

The analysis of the water demand for irrigation based on data from grants issued by the Brazilian National Water Agency – ANA (as the São Francisco river is a Union-owned river, grants are issued at the Federal level) indicates that the flow granted along the analyzed section, between São Romão station and Barra station is 68.2 m³/s (ANA, 2005). The distribution of the granted flow rates is shown in Table 7.6.

In a simple mass balance analysis, if at the São Romão station a flow of 1,586 m³/s flows, the effluent flow of the rivers on the left bank of the São Francisco river (where 80% comes from the Urucuia aquifer) is equal to 1,102 m³/s, and the flow at Barra station is equal to 2,620 m³/s, it can be defined that the rivers on the right bank of the São Francisco river contribute only with 32 m³/s, that is, 3% of the total flow, very restricted even if knowing that the contributions of the rivers on the right bank of the middle São Francisco are low (Pereira *et al.*, 2007).

Thus, the flows observed in the stations installed in the middle São Francisco river channel were evaluated through the continuity analysis, with the defined contributions for each sub-basin. In this sense, seeking to understand how the contribution of effluent flows from the UAS to the total flow of the São Francisco river takes place, an analysis was carried out by stretch, and flow losses were observed in the region between the Januária and Fazenda Canadá stations; between Carinhanha and Bom Jesus da Lapa; and between Ibotirama and Barra stations (Table 7.6).

When comparing the fluviometric data with the geological context (Figure 7.9), the presence of karst regions is observed, in which the cavities can result in water derivations from the superficial river course to the underground environment. Such a derivation of the flow can even present significant volumes depending on the degree of karstification and lateral continuity of carbonate rocks layers. This same phenomenon is locally responsible for the total drying up of surface water courses

(Hindi *et al.*, 2002). Therefore, in these segments, the river starts to show an influent drainage behavior; that is, the river feeds the aquifer.

Table 7.6 – Data determined for fifteen small sub-basins on the São Francisco river's left margin, which receive contributions from the UAS.

| Initial Station | Final Station | River Length (km) | Initial Flow (a) (m ³ /s) | UAS Sub-Basins Flow (b) (m ³ /s) | Use Permits Flow (c) (m ³ /s) | Estimated Flow (a+b-c) (m ³ /s) | Observed Final Flow (m ³ /s) | Difference (m ³ /s) |
|-------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------------------|---|--|--|---|--------------------------------|
| São Romão | São Francisco | 65.1 | 1586 | 252.8 | 3.15 | 1836 | 1908 | + 72 |
| São Francisco | Pedras de Maria da Cruz | 68.54 | 1908 | 50.0 | 9.57 | 1948 | 2035 | + 87 |
| Pedras de Maria da Cruz | Januária | 13.51 | 2035 | 4.0 | 0.18 | 2039 | 2168 | + 129 |
| Januária | Fazenda Canadá | 70.31 | 2168 | 19.1 | 24.15 | 2163 | 1834 | - 329 |
| Fazenda Canadá | Manga | 33.33 | 1834 | 6.2 | 7.51 | 1833 | 1952 | + 119 |
| Manga | Carinhanha | 56.29 | 1952 | 149.9 | 10.86 | 2091 | 2206 | + 115 |
| Carinhanha | Bom Jesus da Lapa | 134.79 | 2206 | 31.7 | 3.29 | 2234 | 2125 | - 109 |
| Bom Jesus da Lapa | Gameleira | 49.94 | 2125 | 248.0 | 0,43 | 2373 | 2435 | + 62 |
| Gameleira | Paratinga | 27.94 | 2435 | 30.7 | 0.0014 | 2466 | 2414 | - 52 |
| Paratinga | Ibotirama | 64.65 | 2414 | | 3.61 | 2410 | 2521 | + 111 |
| Ibotirama | Morpará | 84.65 | 2521 | 14.1 | 3.09 | 2532 | 2419 | - 113 |
| Morpará | Barra | 59.09 | 2419 | 295.8 | 2.38 | 2712 | 2652 | - 60 |

Figure 7.9 – Geological map where the stretches of the São Francisco river with a reduced flow are highlighted in red. (CPRM, 2004a, b, c).



Legend:

Beige / orange tones: sand, gravel and unconsolidated siltstone of Cenozoic age

Green tones: sandstones of the Urucua Group of Upper Cretaceous age.

Blue Tones: carbonate rocks of the Bambuí Group of Neoproterozoic age.

Gray tones: siltstones, shale and clayey siltstones of the Bambuí Group of Neoproterozoic age.

Brown tones: quartzites, and metaconglomerates of Mesoproterozoic age.

Pink Tones: granitic and gneissic rocks from Archean to Proterozoic ages.

▼ Fluvimetric station.

In the sections between the Januária and Fazenda Canadá stations; and between the Carinhanha and Bom Jesus da Lapa, carbonate rocks occur associated with the Bambuí Group of Neoproterozoic age with wide lateral continuity and great thickness, including limestone, dolomite, marl, calcareous clay, fetid calcarenite, and clay siltstones. Even in the places where alluvial sediments and paleo terraces with clay and gravel intercalations occur in the geological map, the carbonate rocks of the Bambuí Group are present at the substrate.

There are no exposures of carbonate rocks in the section of the São Francisco river between Ibotirama and Barra, and on the map, the geology is presented as Detritic-Lateritic Coverage and Quaternary alluviums. However, deep tubular wells show carbonate rocks in the rocky substrate under the Cenozoic cover.

SIAGAS is the Brazilian System for Groundwater and Well Data Well Register and shows 15 deep tubular wells located in the Barra and Xique-Xique counties, both located in the vicinity of the São Francisco river valley, which has carbonate rocks attributed to the Salitre Formation and to the Bambuí Group below the alluvial cover (CPRM, 2020).

In the 728 km stretch of the São Francisco river, between the São Romão and Barra stations, it was observed a decrease of 663 m³/s in the expected flow. There is no large water intake in this stretch, and the National Water and Basic Sanitation Agency of Brazil (ANA) currently authorized the collection of only 79.56 m³/s in this same stretch (ANA, 2018). Moreover, this value includes abstractions for the irrigated perimeter of the Jaíba project (located between the Januária and Fazenda Canadá stations), with a license for the use of 379.113.948 m³/ano (12 m³/s) (Codevasf, 2021).

Emphasize that the Jaíba Project have a total area of 107.3 thousand hectare and an irrigable area estimated at 65.9 thousand hectare. But the project implementation was divided into four stages: 24.7 thousand hectares in Stage I, 19.3 thousand hectares in Stage II, 12.2 thousand hectares in Stage III, and 9.7 thousand hectares in Stage IV. When this project is fully operational, it will require a flow of 75 m³/s (Codevasf, 2018; Jaíba, 2016; SEAPA, 2010). However, today only Stage I is completely installed. Stage II is in the initial installation process, with 3,000 ha occupied. Moreover, Stages III and IV did not receive the specific irrigation infrastructure. Currently, ANA Resolution Number 268, of February 6, 2017,

authorizes 12.02 m³/s from the São Francisco river for this project (ANA, 2017c; Codevasf, 2021).

Therefore, it is understood that the karst zone absorbs 20% of the São Francisco river flow. The derivations for water supply and irrigation, cannot explain the decrease flow, once the water pumping for irrigation in the region started in the 1950s, and the flow reduction greater than 100 m³/s, is observed since the beginning of the flow monitoring in 1930s years.

7.4 Conclusions

The series of fluviometric stations data, installed in the middle São Francisco river left bank tributaries, presented a decrease in the annual flow between -13 to -25%, concerning the historical average observed when analyzing the period from 1995 to 2006.

The largest contributions to the middle São Francisco are from the Grande (295.8 m³/s – 27%), Urucuia (240 m³/s – 22%), Corrente (238 m³/s – 21%) and Carinhanha (144 m³/s – 13%) rivers. The Urucuia river presents a different hydrological behavior, where only 68% of the flow is contributed by the baseflow with an average recession time of 37 days, while the other basins present 88% of the flow that reaches the São Francisco river originating in the Urucuia aquifer with a period of recession, on average, of 202 days. Furthermore, the other small sub-basins contribute with 16%, corresponding to a flow of 177 m³/s.

The São Francisco river receives an average annual flow of 1,104 m³/s from the left bank tributaries in its medium segment, 73% of which is made up of the effluent baseflow from the Urucuia aquifer, which corresponds to 811 m³/s.

Considering that the low-flow period on the São Francisco river (the quarterly low-flow: July, August, and September) occurs with a lag of one month about the drought period of the Urucuia aquifer system (the quarterly low-flow: June, July, and August), it is observed in the analysis of this period, that tributaries of the left bank contribute to a flow of 755 m³/s, 671 m³/s coming from the effluent flow of the aquifer, which corresponds to 55% of the baseflow and 53% of the total annual flow of the São Francisco river. This conclusion is different from what is proposed by other authors who consider that the Urucuia aquifer system discharge is responsible for up to 90% of the flow of the São Francisco river during the rainy recession periods.

Concerning the continuity of these flows with those observed in the fluviometric stations installed along the São Francisco river, there is a decrease in discharge between the Januária (44300000) and Fazenda Canadá (44400000) stations, with an annual loss of up to 329 m³/s, if the contributions from the tributaries of the left margin are considered, even removing the total allocated by the grants issued in the section. Since thick layers of carbonate rocks occur in this section, it is concluded that this flow infiltrates to the under bottom karst system.

The same process occurs between the coordinates (-43.7613; -14.3036) and (-43.4351; -13.2572), where the decrease of 109 m³/s occurs, and between the coordinates (-43.2304; -12.1799) and (-43.1303; -11.0919) with a reduction of up to 173 m³/s, that is, downstream the Carinhanha (45298000) and Ibotirama (46150000) stations, respectively, indicating the presence of sinks in the riverbed and in the floodplain that diverts the water to underground cavities in the karst zone. The hypothesis of reducing flow for the karstic systems is the only capable of explaining the significant reduction inflow of a river with the dimensions of the São Francisco.

Considering the entire segment of the middle São Francisco River, it is concluded that up to 20% of the annual flow of the river is absorbed by the karst zone represented by the carbonate rocks of the Bambuí Group (and the Salitre Formation). In the complex context of the relationships between aquifer systems and surface waters, it is possible that the waters drained to the karst systems will return to runoff towards downstream the basin.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Brazilian Geological Survey for the financial and technical support for this research.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na busca pela definição de um modelo de previsão das vazões de base do Sistema Aquífero Urucuia que considerasse as características hidrogeológicas e os dados hidrológicos e climáticos, além das relações com o uso do solo, procedeu-se à análise da integração e da interferência desses aspectos na recarga e geração da vazão de base.

Em relação aos dados climáticos, é importante considerar que:

- Na correlação da precipitação mensal e anual com o índice da Oscilação Multidecadal do Atlântico, os resultados mostraram-se estatisticamente significativos, revelando a potencial teleconectividade dos padrões de circulação climática com a precipitação sobre o Sistema Aquífero Urucuia.
- Na fase positiva do dipolo, ocorrem inibição na formação de nuvens e diminuição da precipitação, o que, conseqüentemente, ocasionam períodos de seca, pois as águas do Atlântico Tropical Norte tornam-se mais quentes e as águas do Atlântico Equatorial e Tropical Sul, mais frias.
- Na fase negativa do dipolo, as águas do Atlântico Norte Tropical tornam-se mais frias e as do Atlântico Sul, mais quentes, gerando aumento dos movimentos ascendentes sobre essas regiões, intensificando a formação de nuvens e, conseqüentemente, aumentando as chuvas.
- Nenhuma correlação foi encontrada entre a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP)/Pacific Decadal Oscillation (PDO), o Índice de Oscilação Sul (IOS)/Southern Oscillation Index (SOI), o El Niño Oscilação do Sul (ENOS)/El Niño Southern Oscillation (ENSO) e a precipitação sobre o Sistema Aquífero Urucuia.
- Com a avaliação das trajetórias de precipitação, observou-se que a umidade específica do ar e a pressão diminuem exponencialmente com a altitude, e que a umidade específica no período AMO negativo foi superior à umidade específica no período AMO positivo, o que mostra maior quantidade de vapor d'água na atmosfera durante o período AMO negativo em relação ao período AMO positivo.
- Os dados de trajetória não mostram variação entre os valores de umidade específica do ar e pressão atmosférica com o aumento ou diminuição da precipitação total, pois os resultados não foram estatisticamente significativos.

- As trajetórias da fase AMO negativa, em média, ocorreram em latitudes menos negativas e mais próximas da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)/Intertropical Convergence Zone (ITCZ), mostrando que esse sistema atmosférico pode influenciar a precipitação durante a fase AMO negativa.
- Em contraste, na fase AMO positiva, em média, as latitudes das trajetórias foram menores e mais próximas do Trópico de Capricórnio, sugerindo que as chuvas receberam pouca influência da ITCZ na fase AMO positiva, e talvez maior influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).
- Na fase AMO positiva, observou-se que as trajetórias apresentavam aspectos de caracol, no sentido anti-horário, ao redor das coordenadas iniciais, principalmente em altitudes mais elevadas, o que sugere a presença de vórtices anticiclônicos.
- Diferentes sistemas atmosféricos geram as tempestades, todas procedentes do oceano Atlântico Sul Tropical, corroborando com a hipótese de que a AMO influencia as precipitações na região.
- Em relação aos sistemas, visualiza-se uma provável atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul nos sistemas oriundos da Amazônia, com forte contribuição dos sistemas equatoriais do oceano Atlântico, dos vórtices ciclônicos de alto nível e das frentes frias oriundas da Antártica ou do oceano Índico.
- Não foi possível correlacionar, no entanto, a alta precipitação diária com um sistema atmosférico predominante.
- Como o padrão de precipitação mostra uma tendência de queda nas últimas décadas, de acordo com teste de Mann-Kendall (CHIEW; SIRIWARDENA, 2005; WMO, 2000), espera-se uma redução na recarga do aquífero e na disponibilidade de água no futuro, mas que poderia mudar com a inversão da fase da AMO.

Em relação ao uso do solo e aos escoamentos total e de base dos rios da região, considerando os respectivos fatores de controle, incluindo os distintos subtipos de aquíferos que compõem o Sistema Aquífero Urucuia e as mudanças do escoamento de base em função dos usos a que as bacias são submetidas, é importante na definição do modelo considerar que:

- Na região de abrangência do Sistema Aquífero Urucuia, a área ocupada pela agricultura tem aumentado de forma exponencial nos últimos anos, a uma taxa anual de 9%.

- Entretanto, essa expansão não ocorre em todo o perímetro uniformemente. As sub-bacias dos rios Corrente e Grande são as que apresentaram maior expansão agrícola e maior presença de feições indicativas de irrigação por pivô central.
- A análise mostrou, também, o desenvolvimento da silvicultura na região, que apresentou aumento na área de floresta plantada a partir de 1991, chegando a 325 km² em 2018, além de aumento exponencial na área urbana e da presença da mineração sobre a área de distribuição do Sistema Aquífero Urucuia a partir de 1999, no município de Taguatinga (TO).
- No sentido oposto, destacam-se as áreas preservadas, que ocupam a maior parte da região com formação campestre, florestal e savânica, que diminuíram a uma taxa média de 1% ao ano, o que corresponde ao desmatamento de 537 km²/ano.
- A região experimentou crescimento exponencial da área irrigada, principalmente após o ano de 2010, com ocupação de 1.492 km² em 2017. Dessa área, 75% estão localizados na sub-bacia do rio Grande, principalmente nos municípios de Barreiras, Luís Eduardo Magalhães e São Desidério.
- Como as estações fluviométricas têm áreas de influência diferentes, observou-se um volume escoado médio igual a 0,6 mm/dia para o período analisado, com variação de 0,2 a 1 mm/dia. Desse volume escoado, 90% são compostos pelas vazões de base provenientes do Sistema Aquífero Urucuia, atingindo constantes de recessão (α) da vazão de base inferiores a 0,047; a duração média da estiagem é de 184 dias (tempo de recessão), o que corrobora com a ideia de que a resposta à recarga é muito lenta na área do SAU.
- A análise das vazões demonstrou que o aumento do uso do solo nas bacias dos rios Corrente e Grande não impactou de forma significativa a vazão dos rios, indicando que a diminuição da chuva é a principal responsável pela redução da vazão nos rios, uma vez que as áreas desmatadas e destinadas ao uso agrícola foram aquelas que apresentaram menor decaimento de vazão. Essa observação decorre do fato de que os rios são alimentados principalmente pelo aquífero regional raso, cuja disponibilidade hídrica depende da viabilidade climática, uma vez que a recarga do Sistema Aquífero Urucuia é exclusivamente oriunda de águas de chuvas que precipitam sobre o aquífero.
- Em relação aos poços, observou-se que a variação da carga potenciométrica é

muito restrita, variando de 0,5 m nas porções do aquífero confinado ou semiconfinado, até 2,2 m nas porções livres do sistema aquífero e que essa variação é devida à recarga natural.

- Também se observou diminuição progressiva do nível freático ao longo do período de análise, o que poderia ser interpretado como redução contínua da recarga. Contudo, esse comportamento também pode ser explicado pela exploração do aquífero em áreas adjacentes, onde o cone de depressão de um poço de bombeamento altera o comportamento natural do nível potenciométrico do poço de monitoramento.
- Em relação à correlação dos dados de precipitação com a variação dos níveis de poços, conclui-se que os níveis freáticos entre 15 e 50 m indicam a presença do aquífero regional livre, com forte correlação entre essas variáveis (p -valor = $1,01 \times 10^{-7}$).
- Os níveis mais profundos que 50 m são indicadores do aquífero livre e apresentam apenas evidência sugestiva de correlação com a precipitação (p -valor entre 0,06 e 0,09).
- Os níveis mais rasos que 15 m não apresentaram correlação com a precipitação (p -valor $> 0,36$), indicando que esses poços definem a condição de artesianismo do aquífero semiconfinado, onde a presença de níveis silicificados em profundidade causa atraso na infiltração, o que limita a correlação entre as chuvas e a recarga.

Ao final, após avaliar o grau de dependência da vazão do rio São Francisco a partir das descargas de base, analisou-se a contribuição da vazão dos rios efluentes do Sistema Aquífero Urucuaia ao longo do trecho do médio São Francisco e o impacto da vazão de base do sistema aquífero na manutenção da vazão desse importante rio brasileiro. Essa análise buscou fornecer informações mais precisas e espacialmente distribuídas, ressaltando que, durante a elaboração do modelo, é importante considerar que:

- A série de dados de estações fluviométricas, instaladas nos afluentes da margem esquerda do médio São Francisco, apresentou decréscimo na vazão anual entre -13 a -25%, em relação à média histórica observada no período de 1995 a 2006.
- As maiores contribuições médias anuais para o médio São Francisco são dos

rios Grande (295,8 m³/s – 27%), Urucuia (240 m³/s – 22%), Corrente (238 m³/s – 21%) e Carinhanha (144 m³/s – 13%).

- As demais pequenas sub-bacias contribuem com 17% da vazão média anual que chega ao rio São Francisco, o que corresponde a uma vazão de 186,2 m³/s.
- O rio Urucuia apresenta comportamento hidrológico distinto e apenas 68% da vazão total são atribuídos ao escoamento de base, com tempo médio de recessão de 37 dias. Nas demais bacias, 88% da vazão total correspondem ao escoamento subterrâneo com origem no SAU, com período de recessão médio de 202 dias.
- O São Francisco recebe uma vazão média anual de 1.104 m³/s dos afluentes da margem esquerda em seu segmento médio, 73% dos quais são constituídos pelo escoamento de base efluente do aquífero Urucuia, que corresponde a 811 m³/s.
- Considerando que o período de baixa vazão do rio São Francisco (vazão trimestral: julho, agosto e setembro) ocorre com defasagem de um mês em relação ao período de estiagem do Sistema Aquífero Urucuia (vazão trimestral: junho, julho e agosto), observa-se na análise desse período que afluentes da margem esquerda contribuem com uma vazão de 755 m³/s, dos quais 671 m³/s são provenientes da vazão efluente do SAU (89%).
- A vazão média anual dos afluentes da margem esquerda corresponde a 43% da vazão total anual do rio São Francisco, mas, no período de baixa vazão do rio São Francisco, essa contribuição chega a 59%.
- Em relação à continuidade dessas vazões com as observadas nas estações fluviométricas instaladas ao longo do rio São Francisco, há diminuição da vazão entre as estações Januária (código: 44.300.000) e Fazenda Canadá (código: 44.400.000), com perda anual de até 329 m³/s, mesmo se consideradas as contribuições dos afluentes da margem esquerda, acrescidas do total destinado às captações outorgadas no trecho. Uma vez que nessa região ocorrem espessas camadas de rochas carbonáticas, conclui-se que o rio se comporta como influente nesse trecho e alimenta o sistema cárstico adjacente.
- O mesmo processo ocorre entre as coordenadas (-43,7613; -14,3036) e (-43,4351; -13,2572), onde ocorre diminuição de 109 m³/s, e entre as coordenadas (-43,2304; -12,1799) e (-43,1303; -11,0919), com redução de até 173 m³/s, ou seja, a jusante das estações Carinhanha (código: 45298000) e Ibotirama (código:

46150000), respectivamente. Esse comportamento indica a presença de sumidouros no leito do rio e na várzea que desviam a água para cavidades subterrâneas na zona cárstica. A hipótese de redução da vazão para os sistemas cársticos é a única capaz de explicar a diminuição significativa da vazão de um rio com as dimensões do São Francisco.

Portanto, resumidamente, conclui-se que a água subterrânea extraída a partir dos poços tubulares profundos, para irrigação, ainda não está afetando a vazão dos rios, mas, aparentemente, está interferindo na reserva não renovável (reserva permanente) do Sistema Aquífero Urucuia em sua porção confinada. Considerando todo o segmento do médio São Francisco, conclui-se que até 20% da vazão anual do rio são absorvidos pela zona cárstica representada pelas rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (e da Formação Salitre). No complexo contexto das relações entre os sistemas aquíferos e as águas superficiais, é possível que as águas drenadas para os sistemas cársticos voltem a escoar para o rio São Francisco para jusante.

O Serviço Geológico do Brasil – CPRM realizou, em 2017, o monitoramento integrado na região do Sistema Aquífero Urucuia, incluindo o monitoramento das vazões dos rios e do nível d'água subterrânea (CPRM, 2017a, b, c). Para ampliar a acurácia desta análise, podem-se incorporar as informações climáticas, de uso de solo e dos subtipos de aquíferos, criando-se, assim, um sistema de alerta hidrológico para previsão da vazão de base fornecida durante o período de estiagem, considerando as distribuições de probabilidade que melhor representam o comportamento dos dados de chuva, vazão total e vazão de base.

Após a conclusão desta pesquisa, recomenda-se proceder aos seguintes estudos complementares:

- Avaliar o impacto do uso do solo nas sub-bacias dos rios Tocantins e Parnaíba, que recebem as vazões afluentes do SAU.
- Analisar dados hidroquímicos e isotópicos ambientais das águas subterrâneas da região, buscando aprofundar o conhecimento da interação entre as águas superficiais e as águas provenientes dos diferentes subtipos de aquíferos.
- Avaliar o grau de dependência da vazão do rio Tocantins a partir das descargas de base do Sistema Aquífero Urucuia, semelhante ao modelo que foi aplicado aos dados dos tributários do rio São Francisco.

- Avaliar o impacto das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) na vazão dos rios ao longo do dia, principalmente em estruturas instaladas próximo às nascentes e nas zonas de recarga.
- Estudar, com uso de dados isotópicos e traçadores, os caminhos subterrâneos que as águas do rio São Francisco percorrem ao serem absorvidas pelos sistemas cársticos distribuídos ao longo da calha fluvial no setor do submédio de sua bacia. Nesse caso, indicamos o uso dos isótopos de estrôncio (Sr), o qual, segundo diversos pesquisadores, funciona como uma impressão digital dos aquíferos, sendo bastante utilizado como traçador das interações rocha-água e misturas de águas (FROST; TONER, 2004; NÉGREL, 2006; ALEMAYEHU; EISENHAUER; DIETZEL, 2011; CRESPI, 2012). Esse isótopo também é utilizado para identificar o impacto nas águas superficiais e subterrâneas afetadas por drenagens ácidas da mineração ou para investigar os efeitos da agricultura nas águas subterrâneas e superficiais. Em diversas pesquisas, emprega-se a razão isotópica $87^{Sr}/86^{Sr}$ para avaliar as fontes de contaminação e misturas de águas naturais (BORDALO; MOURA; SCHELLER, 2007).

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.C.L.S. **Estimativa de recarga da bacia do rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/3890/1/2009_AnaCarolinaLdosSAlbuquerque.pdf>.

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**, Campina Grande, v. 15, n. 11, p. 1123-29, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662011001100003&script=sci_abstract&tlng=pt>.

ALEMAYEHU, T.L.A.; EISENHAUER, A.; DIETZEL, M. Multi-proxy ($^2\text{H}/\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) for the evolution of carbonate-rich groundwater in basalt dominated aquifer of Axum area, northern Ethiopia. *Geochemistry*, v. 71, n. 2, p. 177-87, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2011.02.007>>.

ALVES, A.S.; ARAÚJO, L.E. Avaliação climática da precipitação da bacia hidrográfica do rio Camaratuba – PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, n. 5, p. 1556-68, 2015. Disponível em: <<file:///C:/Users/sueli/Downloads/233479-93782-1-PB.pdf>>.

ALVES, D.D. et al. Modelagem das trajetórias de ar (HYSPLIT) aplicada ao monitoramento de material particulado fino (MP_{2,5}) como ferramenta de gestão da qualidade do ar. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA PARA O MEIO AMBIENTE, 6., 2018, Bento Gonçalves. **Anais...**

ALVES, J.M.B. Recentes variações climáticas no nordeste do Brasil com ênfase a precipitação: relações com o ENOS, dipolo de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical e a oscilação decadal do Pacífico. **Revista de Geografia**, Recife, v. 29, n. 3, p. 147-66, 2012.

AMATO, F.; HOPKE, P.K. Source apportionment of the ambient PM_{2,5} across St. Louis using constrained positive matrix factorization. **Atmospheric Environment**, v. 46, p. 329-37, jan. 2012.

ANA. Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do sistema aquífero Urucua e proposição de modelo de gestão integrada compartilhada. In: _____. **Catálogo de metadados da ANA**. Brasília, DF: ANA, 2017b. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b26a6c8e-affa-4766-8cb7-ccdaadb3453>>.

ANA. Mapa interativo de outorgas de direito de uso de recursos hídricos. 23 fev. 2018. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/regulacao/principais-servicos/outorgas-emitidas/outorgas-emitidas>>. Acesso em: 30 out. 2020.

ANA. **Monitor de secas**: nordeste – dez. 2014. Elaborado em 20 jan. 2015. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/>>. Acesso em: 3 maio 2018.

ANA. **Monitor de secas**: nordeste – dez. 2015. Elaborado em 19 jan. 2016. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/>>. Acesso em: 3 maio 2018.

ANA. **Monitor de secas**: nordeste – dez. 2016. Elaborado em 12 jan. 2017a. Disponível em: <<http://monitordesecas.ana.gov.br/>>. Acesso em: 3 maio 2018.

ANA. **Resolução n. 268, de 06 de fevereiro de 2017**. Brasília, DF: ANA, 2017c. Disponível em: <<https://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/268-2017.pdf>>.

ANA. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. HIDROWEB: sistema de informações hidrológicas. 2005. Disponível em: <hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: 24 jan. 2020.

ANA; EMBRAPA. Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil (1985-2017). 2. ed. Brasília, DF: ANA, 2019. Disponível em: <<file:///C:/Users/sueli/Downloads/Levantamento-agricultura-irrigada.pdf>>.

ARAÚJO, L.E.; MORAES NETO, J.M. de; SOUSA, F. de A.S. Classificação da precipitação anual e da quadra chuvosa da bacia do rio Paraíba utilizando índice de anomalia de chuva (IAC). **Ambiente & Água**, v. 4, n. 3, p. 93-110, 2009.

ARNOLD, J.G. et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques. **Groundwater**, v. 33, n. 6, p. 1010-18, 1995.

ARNOLD, J.G. et al. **Soil Water Assessment Tool**: input/output documentation version 2012. Texas: Texas Water Resources Institute, College Station, 2012. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>>.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 35, n. 2, p. 13353-66, 1999. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x>>.

ARSHAM, H. Kuiper's P-value as a measuring tool and decision procedure for the goodness-of-fit test. **Journal of Applied Statistics**, v. 15, n. 2, p. 131-5, 28 jan. 1988.

BARBOSA, N.S. et al. Caracterização hidráulica e da dinâmica hidrológica do sistema aquífero Urucuia na região oeste do estado da Bahia. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17., 2010, São Luís. **Anais...**

BARBOSA, N.S. et al. Caracterização hidrolitoestratigráfica do sistema aquífero Urucuia com base em perfis geofísicos de poços. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18., 2014, Belo Horizonte. **Anais...**

BARBOSA, N.S. et al. Modelo hidrogeológico conceitual do sistema aquífero Urucuia centro-ocidental, Brasil. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 1, 10 jan. 2017.

BARBOSA, N.S. **Hidrogeologia do sistema aquífero Urucuia na região das bacias hidrográficas dos rios Formoso e Arrojado, oeste do estado da Bahia**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

BAZILIAN, M. et al. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. **Energy Policy**, v. 39, n. 12, p. 7896-7906, 2011.

BOMFIM, F.; GOMES, R. Aquífero Urucuaia: geometria e espessura: ideias para discussão. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, Mato Grosso. **Anais...**

BORDALO, A.O.; MOURA, C.A.V.; SCHELLER, T. Determinação da composição isotópica de estrôncio em águas naturais: exemplos de sua aplicação em águas subsuperficiais da zona costeira na região Bragantina-PA. **Química Nova**, v. 30, p. 821-27, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000400012>>.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste/Conselho Deliberativo. Resolução nº 107, de 27 de julho de 2017. Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 set. 2017a. Edição:176. Seção: 1. p. 48.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste/Conselho Deliberativo. Resolução nº 115, de 23 de novembro de 2017. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 5 dez. 2017b. Edição: 232. Seção: 1. p. 26-27-34.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Lista de municípios integrantes da região do semiárido (2017)**. Publicado em dez. 2017c. Disponível em: <<http://www.cca.ufpb.br/cca/contents/noticias/ibge-divulga-lista-de-municipios-localizados-na-regiao-semiarida-do-brasil/lista-1262municipios-semiarido-2017.pdf>>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Caderno da região hidrográfica do São Francisco**. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: MMA, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução n. 32, de 15 de outubro de 2003. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 out. 2003. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2032.pdf>>.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução n. 2, de 21 de junho de 2016. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 jun. 2016. Edição 118, seção 1, p. 87. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-2-de-21-de-junho-de-2016-23061587>>.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>.

BRUTSAERT, W.; NIEBER, J.L. Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. **Water Resources Research**, v. 13, n. 3, p. 637-43, 1977.

BUFFON, E.M.; BINDA, A.L. Variabilidade no regime pluvial do município de Abelardo Luz (SC) no período de 1958 a 2008: interações entre mecanismos de teleconexão decadal e interanual. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 13, 2014.

CAMPOS, J.E.G.; DARDENNE, M.A. Estratigrafia e sedimentação da bacia sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 269-82, 1997.

CARVALHO, J.O. **A economia política do nordeste**: secas, irrigação e desenvolvimento. Rio de Janeiro: Campus, 1988.

CARVALHO, T.M. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, n. 1, p. 73, 2018.

CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**: volume Brasil. 2 ed. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2012.

CERQUEIRA, K.F.; SANTOS, F. de A. dos; AQUINO, C.M.S. Análise das precipitações em trecho do médio curso da bacia hidrográfica do rio Poti (Piauí), a partir do índice de anomalia de chuva (IAC). **RA' e Ga**, Curitiba, v. 45, n. 1, p. 110-122, 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/sueli/Downloads/51001-254249-1-PB.pdf>.

CHIESSI, C.M. et al. Possible impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American summer monsoon. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 21, p. L21707, 2009.

CHIEW, F.; SIRIWARDENA, L. Trend/change detection software: user guide. **CRC for Catchment Hydrology**, Austrália, 2005.

CODEVASF. **Jaíba (MG)**. 30 jul. 2018. Disponível em: <<https://www.codevasf.gov.br/linhas-de-negocio/irrigacao/projetos-publicos-de-irrigacao/elenco-de-projetos/em-implantacao/jaiba-mg>>. Acesso em: 3 dez. 2020.

CODEVASF. Jaíba: etapa I. In: _____. **Projetos públicos de irrigação em produção**. Última modificação: 18 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.codevasf.gov.br/linhas-de-negocio/irrigacao/projetos-publicos-de-irrigacao/elenco-de-projetos/em-producao/jaiba-etapa-i-mg>>. Acesso em: 29 mar. 2021.

COLLISCHONN, W.; FAN, F.M. Defining parameters for Eckhardt's digital base flow filter. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 18, p. 2614-22, 2012.

COSTA, M.H. et al. **Atlas do oeste da Bahia**. Viçosa: AIBA, 2019.

COSTA, M.H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J.A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, n. 1-4, p. 206-17, 2003.

COSTA, W.D. et al. **Hidrogeologia da bacia sedimentar do Urucuia**: bacias hidrográficas dos rios Arrojado e Formoso. Rio de Janeiro: CPRM; UFBA, 2008. Projeto Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semiárida do Nordeste Brasileiro.

CPRM. **Acompanhamento da estiagem**: relatório 02/2017. Belo Horizonte: CPRM, 2017a. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20081>>.

CPRM. **Acompanhamento da estiagem**: relatório 03/2017. Belo Horizonte: CPRM, 2017b. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20080>>.

CPRM. **Acompanhamento da estiagem**: relatório 04/2017. Belo Horizonte: CPRM, 2017c. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20079>>.

CPRM. **Aquífero Urucuia**: caracterização hidrológica; dados secundários. Belo Horizonte: CPRM, 2019.

CPRM. **Atlas pluviométrico do Brasil**. Porto Alegre: CPRM, 2016. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>.

CPRM. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo**: Belo Horizonte: folha SE.23. Brasília: CPRM, 2004c. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/4993>>.

CPRM. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo**: Brasília: folha SD.23. Brasília: CPRM, 2004b. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil. <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/2385>

CPRM. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo**: Rio São Francisco: folha SC.23. Brasília: CPRM, 2004a. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/4984>>.

CPRM. **SIAGAS**: sistema de informações de águas subterrâneas. 2020. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: 30 out. 2020.

CPRM. **Sistema aquífero Urucuia**: bacia sedimentar sanfranciscana. Relatório diagnóstico. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. CPRM: Belo Horizonte, 2012. V. 10. Disponível em: <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/PDF_RIMAS/VOLUME10_Sistema_Aquifero_Urucuia_BA.pdf>.

CRESPI, A.M. **Aplicação de isótopos de estrôncio, oxigênio e hidrogênio como traçadores de anomalias hidrogeoquímicas de bário no sistema aquífero Bauru no município Gália (SP)**. 2013. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CRUZ, F.T. et al. A climatological analysis of the southwest monsoon rainfall in the Philippines. **Atmospheric Research**, v. 122, p. 609-16, mar. 2013.

CUNHA, V.C.V. da. **Avaliação da interação entre águas subterrâneas e superficiais na bacia do rio das Fêmeas, sistema aquífero Urucuia – Bahia**. 2017. 135 f. Dissertação (Mestrado) – Comissão Nacional de Energia Nuclear, Belo Horizonte, 2017.

DINIZ, F. de A.; RAMOS, A.M.; REBELLO, E.R.G. Normais climatológicas do Brasil 1981-2010. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n. 2, p. 131-143, 2018. Disponível em: <<file:///C:/Users/sueli/Downloads/26330-125210-1-PB.pdf>>.

DORA, A.S. **Quantificação de reservas renováveis de água subterrânea em bacias hidrográficas a partir de séries históricas de vazão**: uma ferramenta para a gestão de bacias. 2013. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

Disponível em:

<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/114546/000930617.pdf?sequence=1>>.

DUTTA, D. et al. Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived vegetation condition index (VCI) and standardized precipitation index (SPI). **Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 18, n. 1, p. 53-63, 2015.

ECKHARDT, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 1-2, p. 168-73, 2008.

ENFIELD, D.B.; MESTAS-NUÑEZ, A.M.; TRIMBLE, P.J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 10, p. 2077-80, 2001.

ENGELBRECHT, B.Z., 2014. **Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas na bacia do rio Corrente (BA)**. 2014. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2014.

ENGELBRECHT, B.Z.; CHANG, H.K. Simulação numérica do fluxo de águas do sistema aquífero Urucuia na bacia hidrogeológica do rio Corrente (BA). **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 244-56, 2015. Disponível em: <<file:///C:/Users/sueli/Downloads/28435-Texto%20do%20artigo-104949-2-10-20151030.pdf>>.

ESCOBAR, G.C.J.; SELUCHI, M.E.; ANDRADE, K. Classificação sinótica de frentes frias associadas a chuvas extremas no leste de Santa Catarina (SC). **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 31, n. 4, p. 649-61, 2016.

FONTES, J.G. **Monitoramento e análise da variação do nível d'água para estimativa da recarga do aquífero Urucuia na bacia do Rio Grande – BA**: contribuições para a gestão e uso sustentável de águas subterrâneas. 2020. 112 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

FRANCO, A.C.L.; BONUMÁ, N.B. Multi-variable SWAT model calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow. **RBRH**, v. 22, 2017.

FREITAS, M.A. de S. Um sistema de suporte à decisão para o monitoramento de secas meteorológicas em regiões semiáridas. **Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 19-30, 1998.

FROST, C.D.; TONER, R.N. (2004) Strontium Isotopic Identification of water-rock interaction and ground water mixing. **Groundwater**, v. 42, n. 3, p. 418-32. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02689.x>>.

- GAN, M. A. et al. **Monção da América do Sul**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), São José dos Campos, 2016.
- GARREAUD, R.D. et al. Present-day South American climate. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 281, n. 3-4, p. 180-95, 2009.
- GASPAR, M.T.P. **Sistema aquífero Urucuia**: caracterização regional e propostas de gestão. 2006. 158 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- GASPAR, M.T.P.; CAMPOS, J.E.G. O sistema aquífero Urucuia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 4, p. 216-26, 2007.
- GASPAR, M.T.P.; CAMPOS, J.E.G.; CADAMURO, A.L. de M. Condições de infiltração em solos na região de recarga do sistema aquífero Urucuia no oeste da Bahia sob diferentes condições de usos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 542-50, 2007.
- GIORDANO, S.R. **Competitividade regional e globalização**. 1999. 249 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- GOMES, A.W. **Impactos da variabilidade temporal do regime pluviométrico na recarga de aquíferos**: estudo de caso em Caetité-BA. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- GONÇALVES, R.D. et al. Using GRACE to quantify the depletion of terrestrial water storage in Northeastern Brazil: the Urucuia aquifer system. **Science of the Total Environment**, v. 705, p. 135845, 2020.
- GONÇALVES, R.D. **Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas na bacia do Rio Grande (BA)**. 2013. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.
- GONÇALVES, R.D.; ENGELBRECHT, B.Z.; CHANG, H.K. Análise hidrológica de séries históricas da bacia do rio Grande (BA): contribuição do sistema aquífero Urucuia. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 190, 2016.
- GONÇALVES, R.D.; ENGELBRECHT, B.Z.; CHANG, H.K. Evolução da contribuição do sistema aquífero Urucuia para o rio São Francisco, Brasil. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2018.
- GONÇALVES, T.D.; LOHE, C.; CAMPOS, J.E.G. Hydraulic characterization from porous aquifers of the Brazilian Federal District. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45, n. 2, p. 259-71, 2015.
- GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. da. **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.
- GUIMARÃES, A.G.L.; COSTA, A.T.; CAMPOS, J.C.V. **Avaliação sobre as condições atuais de exploração dos poços e dinâmica de fluxo do aquífero Urucuia**: produto 4 – relatório final. Salvador: ICADS-UFBA, 2009. Disponível em: <<https://landmatrix.org/media/uploads/water-campo-aberto.pdf>>.

HÄNSEL, S.; SCHUCKNECHT, A.; MATSCHULLAT, J. The modified rainfall anomaly index (mRAI) – is this an alternative to the standardised precipitation index (SPI) in evaluating future extreme precipitation characteristics? **Theoretical and Applied Climatology**, v. 123, n. 3-4, p. 827-44, 2016.

HEWLETT, J.D.; NUTTER, W.L. **An outline of forest hydrology**. Georgia: University of Georgia Press, 1969.

HINDI, E.C. et al. Características hidrogeológicas do aquífero cárstico em Colombo (PR) e impactos ambientais resultantes da sua exploração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, Florianópolis. **Anais...**

HOSKING, J.R.M.; WALLIS, J.R. **Regional frequency analysis: an approach based on L-moments**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

HUYCK, A.A.O.; PAUWELS, V.R.N.; VERHOEST, N.E.C. A base flow separation algorithm based on the linearized Boussinesq equation for complex hillslopes. **Water Resources Research**, v. 41, n. 8, p. 1-18, 2005.

IBGE. **Banco de dados de informações ambientais: geomorfologia: unidades de relevo**. 2019a. Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/geomorfologia>>. Acesso em: 6 jun. 2020.

IBGE. **Estimativas da população: tabelas 2020**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 1 mar. 2021.

IBGE. **Malha municipal: acesso ao produto – 2017**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=27411&t=acesso-ao-produto>>.

IBGE. **Manual técnico de geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. v. 5. Disponível em: <http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/2009_10%20Manual%20Tecnico%20de%20Geomorfologia.pdf>.

IBGE. **Mapa de unidades de relevo do Brasil: escala 1:5.000.000**. 2. ed. Projeção policônica. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Censo demográfico 2010: séries temporais**. 2012a. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-demografico/series-temporais/series-temporais/>>.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Censo demográfico: tabela 200 – população residente, por sexo, situação e grupos de idade – amostra – características gerais da população**. 2012b. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/200>>.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Produção agrícola municipal: PAM 2019b**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 25 mar. 2021.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil: período 1961-1990**. Brasília, DF: INMET, 2012. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>.

IPCC. **Climate change 2007**: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. v. 59.

JAÍBA. **Projeto Jaíba**: ficha fundiária. 2016. Distrito de Irrigação Jaíba. Disponível em: <<https://www.projetojaiba.com.br/index.php/paginas/3>>. Acesso em: 3 dez. 2020.

JURY, M.R.; ENGERT, S. Teleconnections modulating inter-annual climate variability over northern Namibia. **International Journal of Climatology**, v. 19, p. 1459-75, 1999. Disponível em: <[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19991115\)19:13<1459::AID-JOC397>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19991115)19:13<1459::AID-JOC397>3.0.CO;2-A)>.

KALCIC, M.M.; CHAUBEY, I.; FRANKENBERGER, J. Defining soil and water assessment tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 69-80, 2015.

KAYANO, M.T. et al. A further analysis of the tropical Atlantic SST modes and their relations to north-eastern Brazil rainfall during different phases of Atlantic multidecadal oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 12, p. 4006-18, 2016.

KAYANO, M.T.; ANDREOLI, R.V. Variabilidade decenal a multidecenal. In: CAVALCANTI, I.F.A. et al. (Ed.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 464.

KAYANO, M.T.; CAPISTRANO, V.B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162-178, 2014.

KIANG, C.H.; SILVA, F.P.E. Contribuição ao arcabouço geológico do sistema aquífero Urucuia. **Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 4, p. 872-82, 2015.

KIM, E. et al. Analysis of ambient particle size distributions using unmix and positive matrix factorization. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 1, p. 202-9, 2004.

KOUSKY, V.E.; ALONSO, Gan M. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, p. 538-51, 1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.3402/tellusa.v33i6.10775>>.

KRAUS, E.B. Subtropical droughts and cross-equatorial energy transports. **Monthly Weather Review**, v. 105, n. 8, p. 1009-18, 1977.

LEAVESLEY, G.; MARKSTROM, S. USGS Watershed Model Evolution – RRM (1972) to GSFLOW (2012). In: DONIGIAN, A.S.; FIELD, R.; BAKER, M. (Ed.). **Fifty years of watershed modeling**: past, present and future. Colorado: ECI Symposium Series, 2012.

LEAVESLEY, G.H. **A mountain watershed simulation model**. Colorado: Colorado State University, 1973.

LEAVESLEY, G.H. et al. Precipitation-runoff modeling system: user's manual. **Water-Resources Investigations**, Colorado, 1983. Report 83-4238.

- LIEBMANN, B.; MECHOSO, C.R. The South American monsoon system. In: CHANG, C.-P. et al. (Ed.). **The global monsoon system: research and forecast**. 2. ed. New York: World Scientific Publishing Company, 2011. p. 137-57.
- LIMA, R.P.C. et al. Development of an annual drought classification system based on drought severity indexes. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 91, n. 1, 2019.
- LIMBERGER, L. Estudos de teleconexões atmosféricas e possibilidades de avanços na climatologia geográfica: conceitos, fontes de dados e técnicas. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 19, p. 10-19, 2016.
- LIU, W.T.; JUÁREZ, R.I.N. ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 17, p. 3483-3501, 2001. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160010006430>>.
- LUO, Y. et al. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan mountains, northwest China. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 4, p. 1259-67, 2012.
- LYNE, V.; HOLLICK, M. Stochastic time-variable rainfall runoff modelling. In: HYDROLOGY AND WATER RESOURCES SYMPOSIUM, 1979. Berth, Australia: National Committee on Hydrology and Water Resources of the Institution of Engineers, 1979. **Anais...**
- LYNN, P.A. **An introduction to the analysis and processing of signals**. London: Macmillan Education UK, 1973.
- MACARRINGUE, L.S. et al. Considerações sobre precipitação, relevo e solos e análise do potencial de expansão agrícola da região norte de Moçambique. **Sociedade & Natureza**, v. 29, n. 1, 2017.
- MANN, H.B.; WHITNEY, D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 18, n. 1, p. 50-60, 1947.
- MANTOVANI, E.C. et al. **Estudo do potencial hídrico da região oeste da Bahia: quantificação e monitoramento da disponibilidade dos recursos do aquífero Uruçuia e superficiais nas bacias dos rios Grande, Corrente e Carinhanha**. Relatório técnico final. Viçosa: AIBA, 2019. Disponível em: <<https://aiba.org.br/wp-content/uploads/2020/02/Relatório-final-Estudo-dos-Recursos-Hidricos-na-Região-Oeste-da-Bahia-v2.pdf>>.
- MANTUA, N.J. et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069-79, jun. 1997.
- MAPBIOMAS. **Projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo no Brasil: coleção 4.1 (1985-2018)**. mar. 2020. Disponível em: <<https://mapbiomas.org>>. Acesso em: 13 out. 2020.
- MARENGO, J.A.; DIAS, P.L.S. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Ed.). **Águas**

doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3. ed. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados da USP, Academia Brasileira de Ciências, 2006. p. 63-109.

MARQUES, E.A.G. et al. Analysis of groundwater and river stage fluctuations and their relationship with water use and climate variation effects on Alto Grande watershed, northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 103, p. 1-11, 2020.

MARSHALL, J. et al. The ocean's role in setting the mean position of the inter-tropical convergence zone. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 7-8, p. 1967-79, 2014.

MATA, C.L. et al. Avaliação multitemporal da susceptibilidade erosiva na bacia do rio Urucuia (MG) por meio da equação universal de perda de solos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, n. 2, p. 57-71, 2007.

MAZZARELLA, A.; GIULIACCI, A.; SCAFETTA, N. Quantifying the multivariate ENSO index (MEI) coupling to CO₂ concentration and to the length of day variations. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, n. 3-4, p. 601-7, 2013.

MIRANDA, A.C.R. **Métodos de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo:** estudo de caso para a bacia do rio das Velhas. Viçosa: Ed. da Universidade Federal de Viçosa, 2012.

MOLION, L.C.B. Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e oscilação decadal do Pacífico. **Climanálise**, São José dos Campos, v. 3, n. 1, p. 1-5, 2005.

MORAES, M.P.C. Análise da variabilidade pluvial na unidade de gerenciamento de recursos hídricos do Paraíba do Sul (UGHRI-2). **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 14, p. 264-74, 2014.

MURARA, P. Técnicas de interpolação para a pesquisa em climatologia regional e agroclimatologia. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, ano 15, p. 106-26, 2019. Edição especial.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NASCIMENTO, K.R.F. et al. **Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do rio das Fêmeas – BA:** resumo executivo. Salvador: Superintendência de Recursos Hídricos, 2003.

NATHAN, R.J.; MCMAHON, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water Resources Research**, v. 26, n. 7, p. 1465-73, 1990.

NDEHEDEHE, C.E.; FERREIRA, V.G. Identifying the footprints of global climate modes in time-variable gravity hydrological signals. **Climatic Change**, v. 159, n. 4, p. 481-502, 2020.

NÉGREL, P. Water-granite interaction: clues from strontium, neodymium and rare earth elements in soil and waters. **Applied Geochemistry**, v. 21, n. 8, p. 1432-54, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.04.007>>.

NEITSCH, P.S.L. et al. Soil and Water Assessment Tool “SWAT”. In: Springer **Reference**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

NERC. **Flood studies report**. V. I. London: Natural Environment Research Council, 1975.

NIELSEN, D.M. et al. Dynamics-based regression models for the South Atlantic convergence zone. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 9-10, p. 5527-53, 2019.

NOAA, **Climate indices**: monthly atmospheric and ocean time series. 2019. Physical Sciences Laboratory (PSL). National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Disponível em: <www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/>. Acesso em: 20 fev.2020.

NOAA. **Climate timeseries**: Atlantic Multidecadal Oscillation Index. AMO unsmooth, long: Standard PSL Format (1856 to 2019). 2001. Physical Sciences Laboratory (PSL). National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data>>. Acesso em: 1 jan. 2019.

NOAA. **Multivariate ENSO (El Niño Southern Oscillation)**. Index (MEI V2) (1979 to 2019). 1999. Physical Sciences Laboratory (PSL). National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei>>. Acesso em: 1 jan. 2019.

NOAA. **Pacific Decadal Oscillation (PDO) (1854 to 2019)**. 2016. Physical Sciences Laboratory (PSL). National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/pdo>>. Acesso em: 1 jan. 2019.

NORONHA, G.C.; HORA, M.A.G.M.; SILVA, L.P. Análise do índice de anomalia de chuva para a microbacia de Santa Maria/Cambiocó, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 31, n. 1, p. 74-81, 2016.

O'HANLEY, J.R. et al. Optimizing hydropower dam location and removal in the São Francisco river basin, Brazil to balance hydropower and river biodiversity tradeoffs. **Landscape and Urban Planning**, v. 195, 2020.

OLDENBORGH, G.J. van et al. Decadal prediction skill in a multi-model ensemble. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 7-8, p. 1263-80, 2012.

OLIVEIRA, L.T. et al. Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia aquifer system in Bahia – Brazil. **Ambiente & Água**, v. 14, n. 6, p. 1, 2019.

PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003.

PASSOS, A.L.O.; ROCHA, S.S.; HADLICH, G.M. Evolução do uso do solo e agronegócio na região oeste do estado da Bahia. **Cadernos de Geociências**, Salvador, v. 7, p. 31-9, 2010.

PEDROSA, V. de A. The necessity of IWRM: the case of San Francisco river water conflicts. In: **VEIRA, E.O. et al. (ed.). Integrated Water Resource Management**. Switzerland: Springer International Publishing, 2020. p. 27-34.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PEREIRA, D.A. et al. Dolinas em arenitos do grupo Urucuia na formação Chapadão na bacia hidrográfica do rio Grande em Barreiras – Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19., 2016, Campinas. **Anais...**

PEREIRA, S.B. et al. Estudo do comportamento hidrológico do rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 615-22, 2007.

PERUCHI, F. **Evapotranspiração real a partir de medidas lisimétricas e sob diferentes condições de disponibilidade hídrica**. 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PIDWIRNY, M. The hydrologic cycle. In: **Fundamentals of physical geography**. 2. ed. Okanagan: University of British Columbia, 2006. Disponível em: <<http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8b.html>>.

PIMENTEL, A.L. et al. Estimativa da recarga do aquífero Urucuia na sub-bacia do rio das Fêmeas – oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas. In: CONGRESSO SOBRE APROVEITAMENTOS E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM PAÍSES DE IDIOMA PORTUGUÊS. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES; AIDIS; ABRH, 2000. p. 27-37.

PIMENTEL, M.L. et al. **Mudanças de uso da terra e expansão da agricultura no oeste da Bahia**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, v. 201).

PINTO, E.J. de A.; ALVES, M.M.S. **Regionalização de vazões das sub-bacias 40 e 41: alto São Francisco**. Belo Horizonte: CPRM, 2001.

RAA, L.A. et al. Interactive comment on “Frequency-dependent effects of the Atlantic meridional overturning on the tropical Pacific ocean”. **Ocean Science Discussions**, v. 6, n. 1, p. 477-90, 2009.

REBOITA, M.S. et al. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terra e Didática**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

REBOITA, M.S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOUÇAS, A. da C. Água na região nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 11, n. 29, p. 127-54, 1997.

REIS JUNIOR., D.S. **Caracterização do comportamento de vazões de base em bacias sem monitoramento fluviométrico**. 2012. 7 f. Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

RODRIGUES, R.R. et al. Common cause for severe droughts in South America and marine heatwaves in the South Atlantic. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 8, p. 620-6, 2019.

RODRIGUES, Z.R.C. **Aplicação de modelos analíticos para outorga e gestão integrada dos recursos hídricos na bacia do rio Grande**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

ROOY, M.P. van. A rainfall anomaly index (RAI) independent of time and space. **Notos**, v. 14, p. 43-8, 1965.

ROSS, J.L.S. **Geografia do Brasil** (Org.). São Paulo: EDUSP, 1996.

SALLES, L. de A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau**. 2012. 114 f. (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

SANTAROSA, L.V. et al. Interação rio-aquífero: contribuição da descarga dos aquíferos nas vazões dos rios Corumbataí e Atibaia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 20., 2018, Campinas. **Anais...**

SANTOS, H.G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. Disponível em: <file:///C:/Users/sueli/Downloads/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004%20(3).pdf>.

SANTOS, H.G. dos. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (Série Embrapa Solos. Documentos, 130.).

SANTOS, M.S. et al. Links between different classes of storm tracks and the flood trends in Spain. **Journal of Hydrology**, v. 567, p. 71-85, dez. 2018.

SANTOS, M.S.; LIMA, C.H.R. Análise de trajetórias de tempestades associadas a cheias máximas anuais no alto rio Paraguai. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019. Foz do Iguaçu. **Anais...**

SANTOS, N.A. dos; SIQUEIRA, A.H.B.; MELO, M.L.D. de. Precipitação sobre a América do Sul e suas relações com a oscilação multidecadal do Atlântico e a oscilação do Atlântico Norte. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 18, n. 12, p. 207-18, 2016.

SCHUSTER, H.D.M. et al. Estudos hidrogeológicos do aquífero Urucuia no oeste baiano para obtenção de parâmetros nas outorgas de mananciais subterrâneos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2002, Florianópolis. **Anais...**

SCHUSTER, H.D.M. **Modelagem de fluxo subterrâneo com vistas à definição de parâmetros para outorgas de mananciais subterrâneos na bacia hidrográfica do rio dos Cachorros – oeste do estado da Bahia**. Salvador: INEMA; PGRH; BIRD, 2003. Relatório final. Contrato n° 0022/2001.

SEAPA (estado de Minas Gerais). **Relatório do projeto Jaíba**: 2005-2010. 14 dez. 2010. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.agricultura.mg.gov.br/files/jaiba.pdf>>., as 10h45.

SILVA, D. et al. Estimativa do coeficiente de cultura (KC) para um sistema de rotação de culturas de trigo e soja. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 21., Catalão, 2019. **Anais...**

SILVA, F.D.P.E.; CHANG, H.K. Sistemas aquíferos da porção centro-norte da bacia Sanfranciscana e estimativa do fluxo regional. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 267-74, 2018.

SILVEIRA, A.L.L. da. Ciclo hidrológico e a bacia hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: EDUFRGS, 2000. p. 253-77.

SLOTO, R.A.; CROUSE, M.Y. **HYSEP**: a computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 1996. Disponível em: <<https://pubs.er.usgs.gov/publication/wri964040>>.

SMITH, K.R. et al. Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In: FIELD, C.B. et al. **Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability: part a: global and sectoral aspects**, 2015. p. 709-54.

SODEMANN, H.; SCHWIERZ, C.; WERNLI, H. Interannual variability of Greenland winter precipitation sources: Lagrangian moisture diagnostic and North Atlantic Oscillation influence. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. D3, p. D03107, 2008.

SOUZA, A.; ALBUQUERQUE, B.F.C.; LOPES, T.C.S.P. Um estudo do índice de Bhalme e Mooley – IBM (Bhalme & Mooley, 1980); índice de anomalia de chuva – IAC (Rooy, 1965) para o estado de Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...**

STEIN, A.F. et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 12, p. 2059-77, 2015.

STOHL, A.; JAMES, P. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: Method description, validation, and demonstration for the august 2002 flooding in central Europe. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, n. 4, p. 656-78, 2004.

SURENDRAN, U. et al. Analysis of drought from humid, semi-arid and arid regions of India using DrinC model with different drought indices. **Water Resources Management**, v. 33, n. 4, p. 1521-40, 2019.

SZILAGYI, J. Heuristic continuous base flow separation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 9, n. 4, p. 311-18, jul. 2004.

SZILAGYI, J. Sensitivity analysis of aquifer parameter estimations based on the Laplace equation with linearized boundary conditions. **Water Resources Research**, v. 39, n. 6, jun. 2003.

THE ECONOMIST. Brazilian agriculture: the miracle of the Cerrado. **The Economist Journal**, 28 ago. 2010.

TOMAZ, P. Vazão base e vazão mínima ecológica. In: _____. **Critério unificado para manejo das águas pluviais em áreas urbanas**. Guarulhos: Plínio Tomaz, 2007. p. 1-31.

TROCH, P.A. et al. The importance of hydraulic groundwater theory in catchment hydrology: the legacy of Wilfried Brutsaert and Jean-Yves Parlange. **Water Resources Research**, v. 49, n. 9, p. 5099-116, 2013.

TUCCI, C.E.M. (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: EDUFGRS, 2000.

USGS. **Shuttle radar topography mission (SRTM)**. 2014. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

VALDÉS-PINEDA, R.; CAÑÓN, J.; VALDÉS, J.B. Multi-decadal 40- to 60-year cycles of precipitation variability in Chile (South America) and their relationship to the AMO and PDO signals. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 1153-170, 2018.

VERHOEST, N.E.C.; TROCH, P.A. Some analytical solutions of the linearized Boussinesq equation with recharge for a sloping aquifer. **Water Resources Research**, v. 36, n. 3, p. 793-800, 2000.

VILLELA, F.N.J.; NOGUEIRA, C. Geologia e geomorfologia da estação ecológica Serra Geral do Tocantins. **Biota Neotropica**, v. 11, n. 1, p. 217-29, 2011.

WALD, A.; WOLFOWITZ, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 14, n. 4, p. 378-88, 1943.

WALLACE, J.M.; HOBBS, P.V. **Atmospheric science: an introductory survey**. 2. ed. London: Academic Press, 2006.

WANG, C. ENSO, Atlantic climate variability, and the walker and Hadley circulations. In: DIAZ, H.F.; BRADLEY, R.S. (Ed.). **The Hadley circulation: present, past and future**. Advances in Global Change Research, v. 21. Springer, Dordrecht, 2004. p. 173-202.

WHITE, K.L.; CHAUBEY, I. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable swat model. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 5, p. 1077-89, 2005.

WMO. **Detecting trend and other changes in hydrological data**. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2000. v. 1013.

WMO. **Guide to hydrological practices: management of water resources and application of hydrological practices**. 6. ed. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2009. v. II.

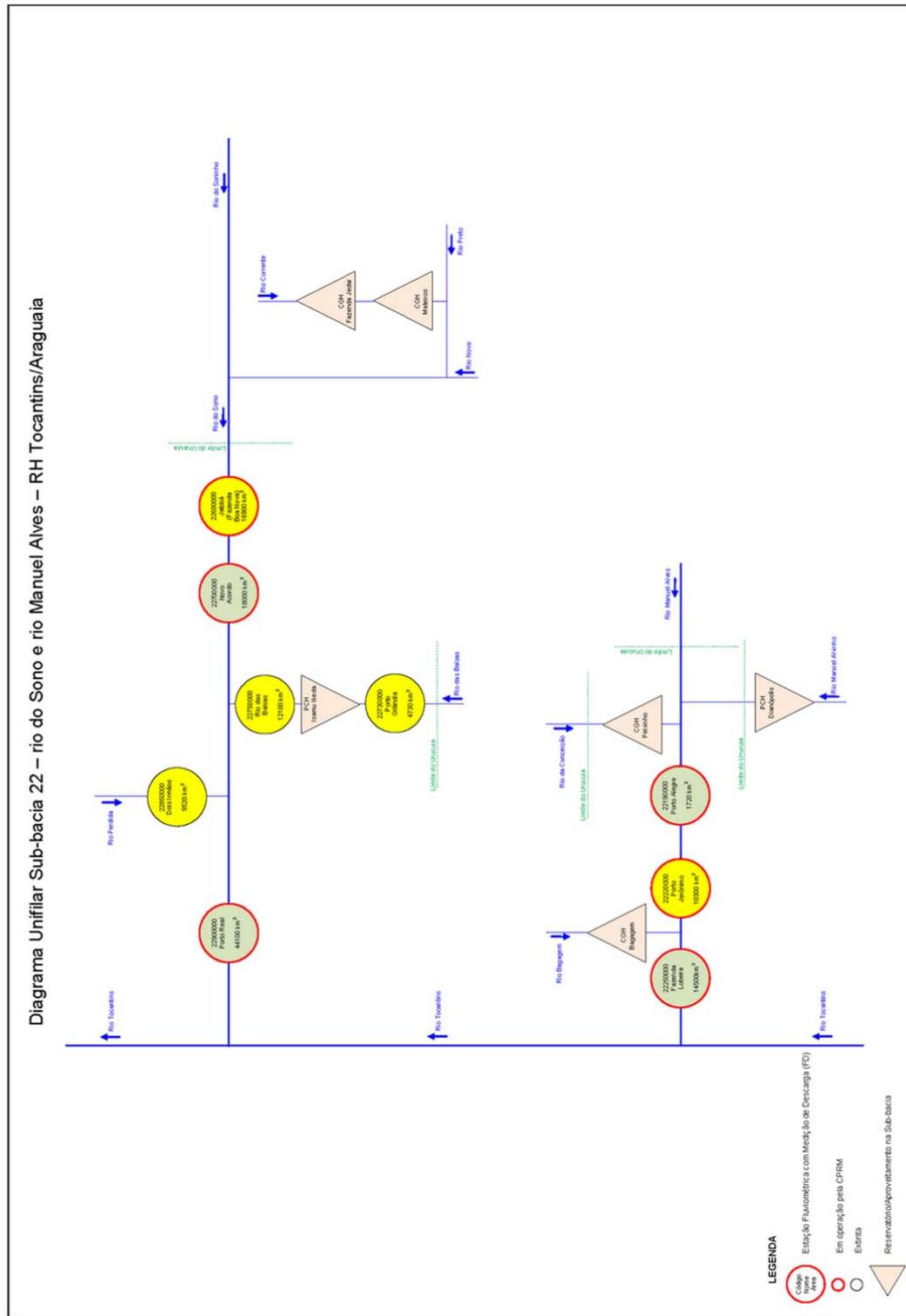
APÊNDICE A – DIAGRAMAS UNIFILARES POR SUB-BACIA COM AS ESTAÇÕES PRÉ-SELECIONADAS

Descrição das cores das estações apresentadas nos diagramas unifilares.

| COR | TAMANHO DA SÉRIE DE DADOS | NOTA |
|--------------|--------------------------------------|-------------|
| Verde-escuro | 40 anos ou mais | A |
| Verde-claro | 30 até 39 anos | B |
| Amarela | 10 até 29 anos | C |
| Laranja | 5 até 9 anos | D |
| Vermelha | Menor que 5 anos* | E |

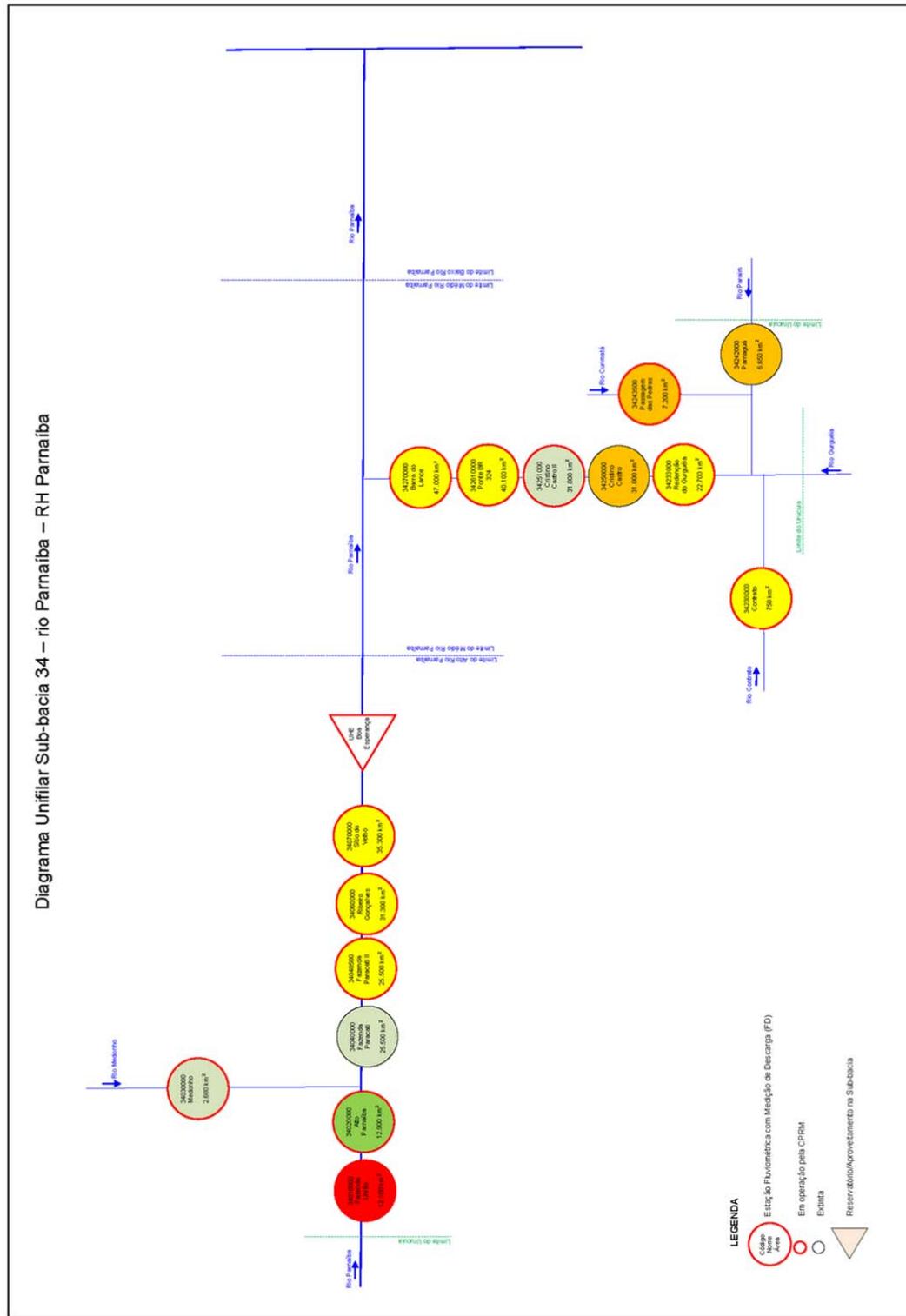
Nota: (*) As estações com séries de dados menores que cinco anos não foram pré-selecionadas para o estudo, por serem curtas para caracterizar um comportamento hidrológico de longo tempo. Entretanto, elas estão apresentadas no diagrama unifilar, por auxiliarem a esclarecer dúvidas nas séries das demais estações.

Figura A.2 – Diagrama unifilar da sub-bacia 22 (rios Manuel Alves e do Sono – região hidrográfica do Tocantins/Araguaia).



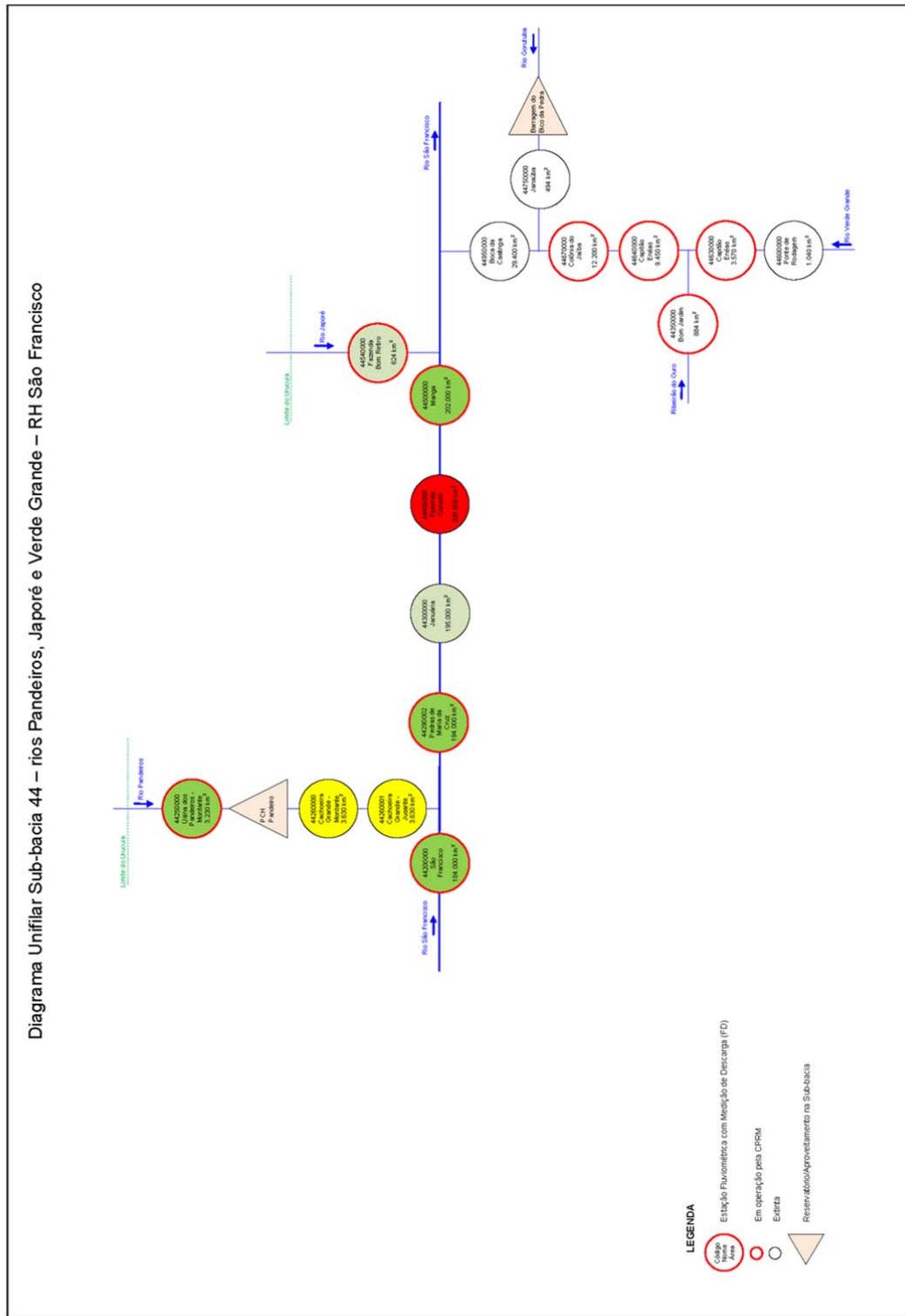
Fonte: Elaborado por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Figura A.3 – Diagrama unifilar da sub-bacia 34 (rio Parnaíba – região hidrográfica do Parnaíba).



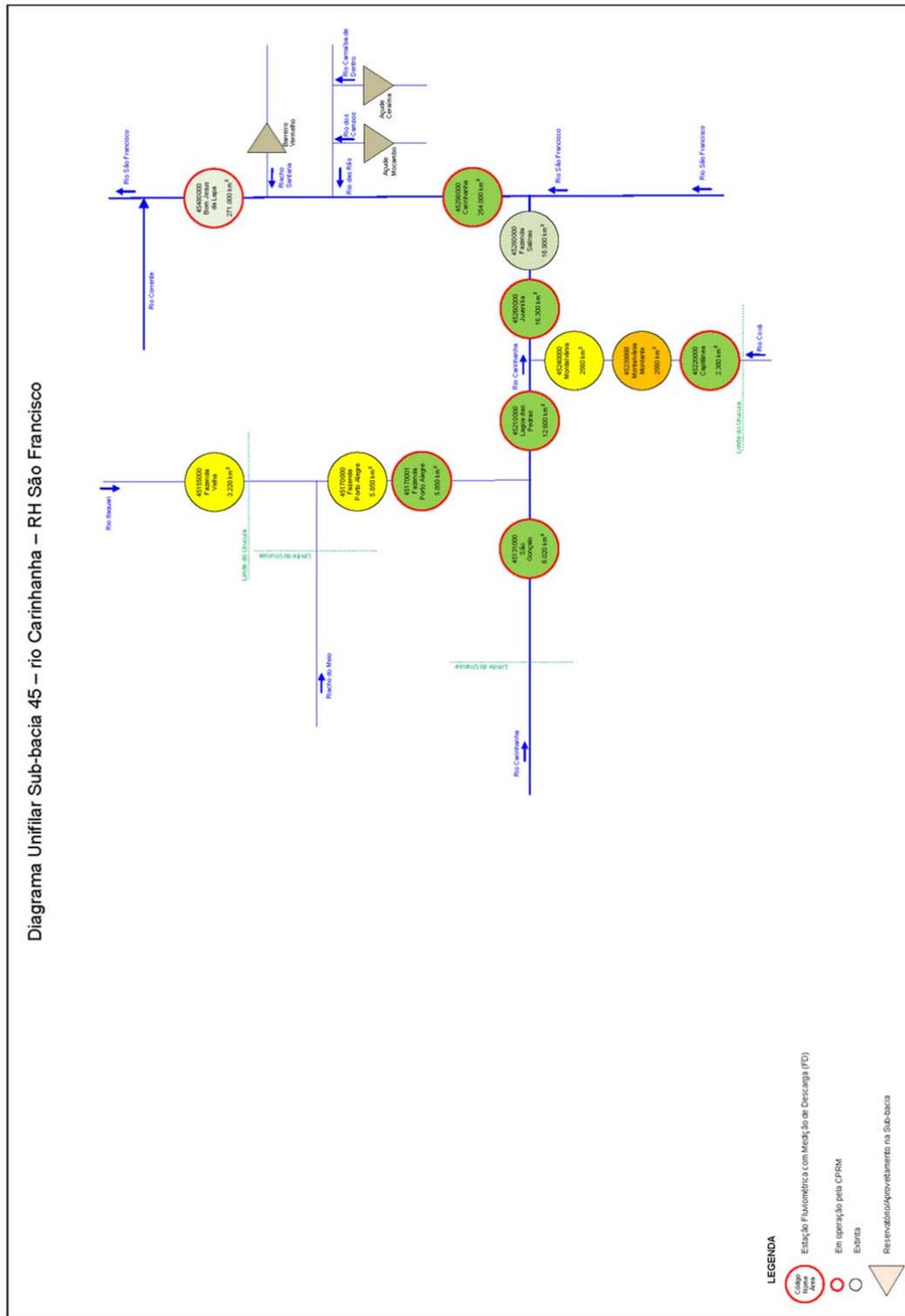
Fonte: Elaborado por Myrta S.B. Vieira, 2020.

Figura A.5 – Diagrama unifilar da sub-bacia 44 (rio Pandeiros, Japoré e Verde Grande – região hidrográfica do São Francisco).



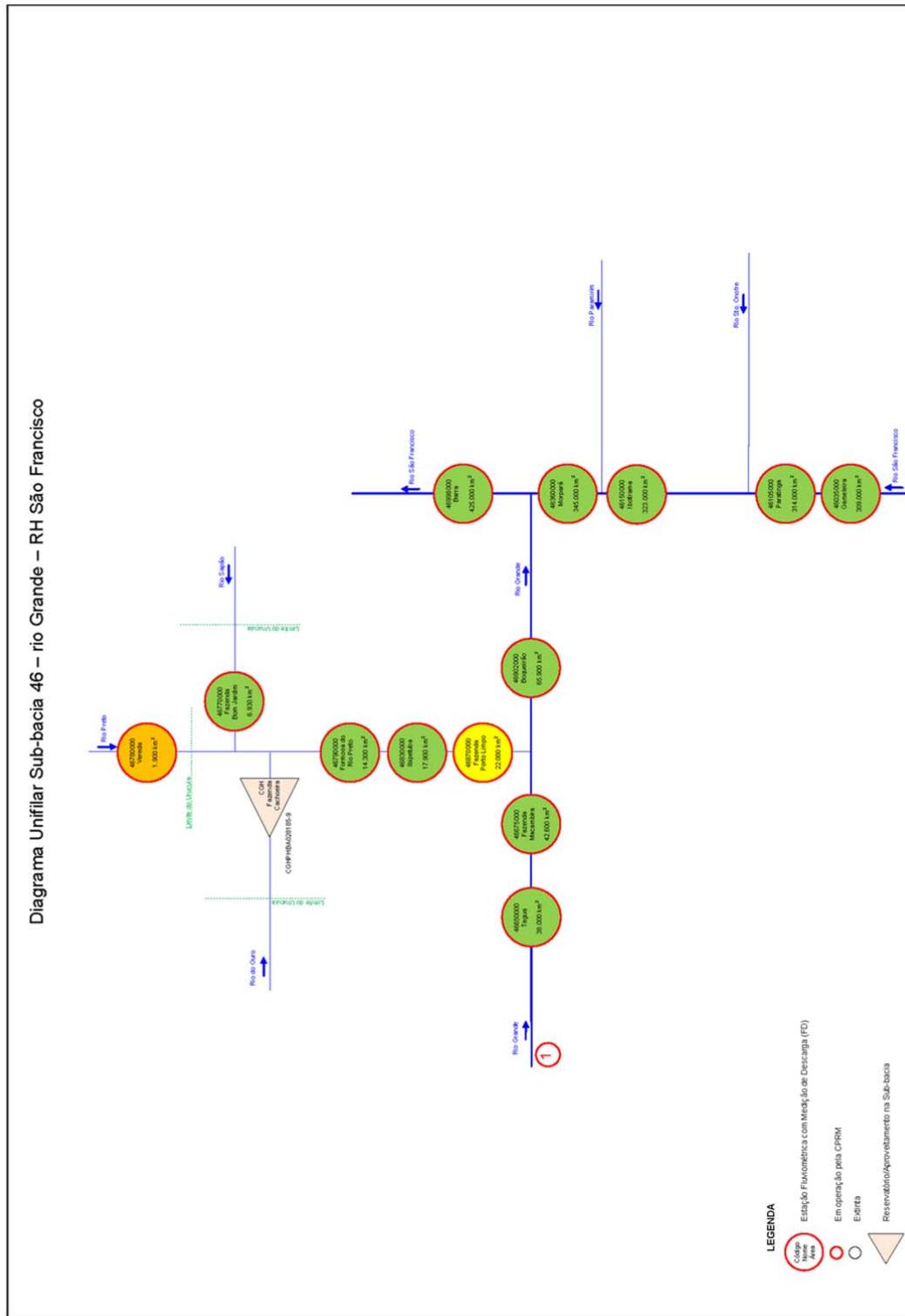
Fonte: Elaborado por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Figura A.6 – Diagrama unifilar da sub-bacia 45 (rio Carinhonha – região hidrográfica do São Francisco).



Fonte: Elaborado por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Figura A.9 – Diagrama unifilar da sub-bacia 46 (rio Grande – região hidrográfica do São Francisco).



Fonte: Elaborado por Myrlla S.B. Vieira, 2020.

**APÊNDICE B – DADOS, FOTOGRAFIAS E MAPAS DA VIAGEM DE CAMPO
PARA CONHECIMENTO E RECONHECIMENTO DOS PONTOS DE
AMOSTRAGEM DA PESQUISA**

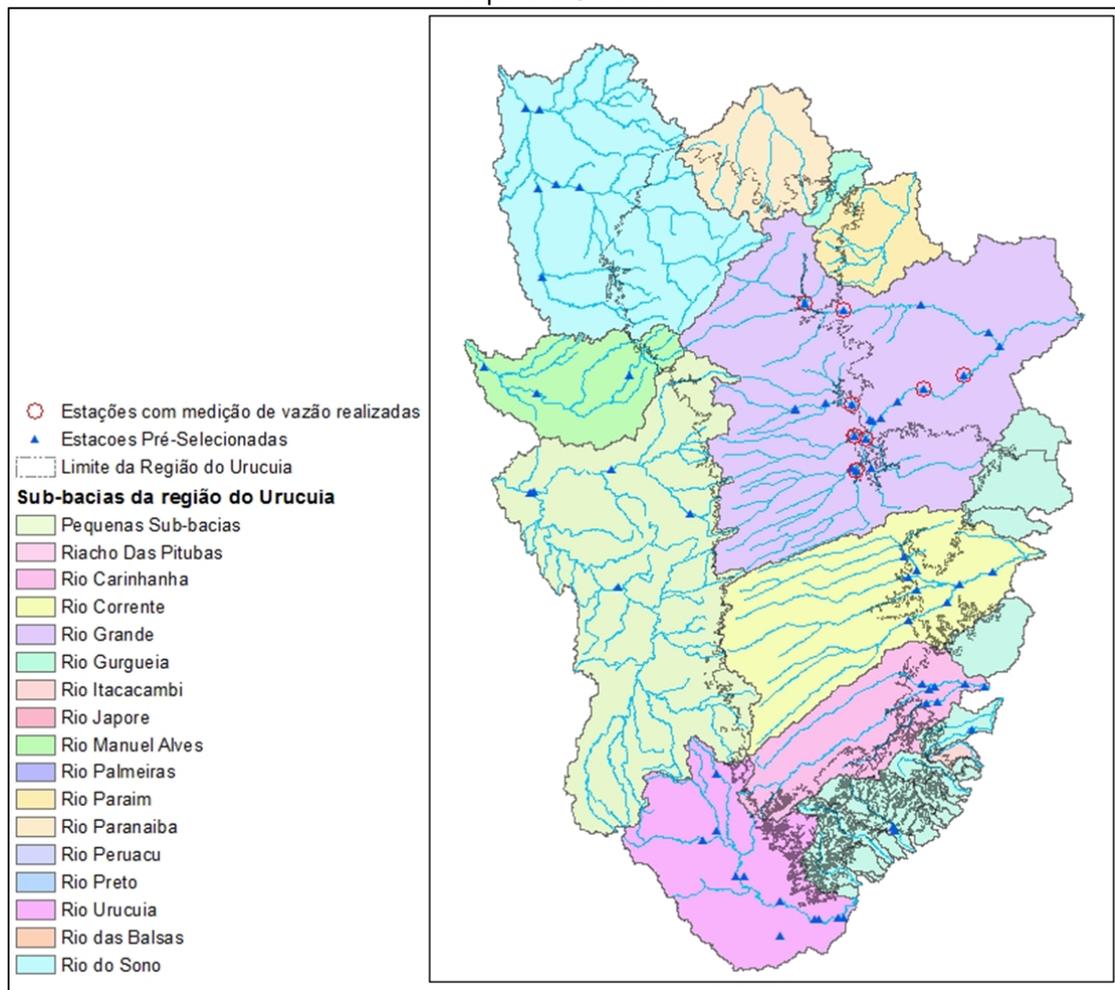
A primeira viagem de campo ocorreu em dezembro de 2017. Na ocasião, visitou-se a área do Sistema Aquífero Urucuia e realizaram-se as medições de vazões em 11 estações fluviométricas, instaladas na rede de drenagem do rio Grande e seus afluentes (Tabela B.1). Apresentam-se, ainda, o mapa de localização das estações selecionadas e visitadas (Figura B.1) e as fotografias do trabalho de campo realizado na região.

Tabela B.1 – Estações fluviométricas visitadas em dezembro de 2017 na área do sistema aquífero Urucuia.

| Estação | Nome | Rio | Município | Latitude | Longitude | Altitude | Área de Drenagem | Tipo Estação |
|----------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------|-----------|----------|------------------|--------------|
| 46415000 | Sítio Grande | Rio Grande | São Desidério | -12,4306 | -45,0856 | 512 | 4950 | FrDSQT |
| 46520000 | Rio de Pedras | Rio Cabeceira de Pedras | Barreiras | 12,1944 | 45,4897 | 0 | 1480 | FDQ |
| 46543000 | Fazenda Redenção | Rio de Ondas | Barreiras | 12,1358 | 45,1033 | 474 | 5380 | FrDQT |
| 46550000 | Barreiras | Rio Grande | Barreiras | 12,1525 | 45,0094 | 437 | 24400 | FrDSQT |
| 46555000 | Brejo Novo | Rio da Boa Sorte | Barreiras | -12,23 | 44,9325 | 0 | 2420 | FDQ |
| 46590000 | Nova Vida - Montante | Rio Branco | Barreiras | 11,8561 | -45,12 | 456 | 7480 | FrDSQT |
| 46650000 | Taguá | Rio Grande | Cotegipe | 11,7208 | 44,5022 | 459 | 36000 | FDQ |
| 46675000 | Fazenda Macambira | Rio Grande | Cotegipe | 11,6106 | 44,1567 | 420 | 39600 | FDQT |
| 46770000 | Fazenda Bom Jardim | Rio Sapão | Formosa do Rio Preto | 10,9936 | 45,5278 | 499 | 6930 | FrDQT |
| 46784000 | Savana | Rio Branco | Riachão das Neves | 11,7714 | 45,6019 | | 685 | FDQ |
| 46790000 | Formosa do Rio Preto | Rio Preto | Formosa do Rio Preto | 11,0514 | 45,1969 | 479 | 14300 | FDSQT |

Fonte: Elaborada por Myrla S.B. Vieira, 2020.

Figura B.1 – Mapa de localização das estações selecionadas e visitadas na área do sistema aquífero Urucuia.



Fonte: Myrlla S.B. Vieira, 2020.

Figura B.2 – Nivelamento da bússola do medidor acústico M9 (estação Fazenda Macambira).



Fotografia: Myrlla S.B. Vieira, 2017.

Figura B.3 – Medição com medidor acústico M9 à barco com cabo de aço (estação Fazenda Redenção).



Fotografia: Myrla S.B. Vieira, 2017.

Figura B.4 – Referência de nível e réguas (estação Savana).



Fotografia: Myrla S.B. Vieira, 2017.

Figura B.5 – Medição com medidor acústico M9 usando uma ponte (estação Savana).



Fotografia: Myrla S.B. Vieira, 2017.

Figura B.6 – Medição com medidor de vazão Flowtracker (estação Brejo Novo).



Fotografia: Myrla S.B. Vieira, 2017.

Figura B.7 – Nivelamento da seção de medição (estação Brejo Novo).



Fotografia: Myrla S.B. Vieira, 2017.

Figura B.8 – Cercado do pluviômetro (estação Rio das Pedras).



Fotografia: Myrla S.B. Vieira, 2017.

Figura B.9 – Medição de sedimentos (estação Sítio Grande).



Fotografia: Myrla S.B. Vieira, 2017.

Figura B.10 – Seção de réguas usada pelos observadores para medição do nível do rio nos horários 7h e 17h (estação Fazenda Bom Jardim).



Fotografia: Myrla S.B. Vieira, 2017.

Figura B.11 – Cercado do pluviômetro e estação automática PCD (estação Formosa do rio Preto).



Fotografia: Myrla S.B. Vieira, 2017.