

Água subterrânea em contexto de escassez hídrica na bacia hidrográfica do Rio São Francisco (MG)

Jeane Dantas de Carvalho ^I
Marília Carvalho de Melo ^{II}
Paulo Galvão Paulo Galvão ^{III}

Wezer Lismar Miranda ^{IV}
Breno Esteves Lasmar ^V

Resumo: Na última década, a escassez hídrica em Minas Gerais afetou a disponibilidade hídrica superficial, levando usuários a privilegiar o uso da água subterrânea como fonte alternativa. A bacia hidrográfica do rio São Francisco é uma das mais importantes dentre as que banham o estado, tanto pela abrangência espacial quanto pela preponderância do uso de água subterrânea. Devido à escassez hídrica resultado de eventos extremos de estiagem entre 2009 e 2018, houve uma tendência no aumento de requerimentos de outorgas de uso de água subterrânea. O objetivo deste artigo foi avaliar a correlação entre o aumento desses requerimentos e períodos de anomalias negativas de precipitações em relação à situação crítica de escassez hídrica, definida pela Deliberação Normativa CERH/MG 49/2015. Observou-se uma relação direta entre anomalias negativas de precipitação e escassez hídrica, e o aumento de requerimentos para uso de águas subterrâneas, principalmente nos anos entre 2014 e 2018.

Palavras-chave: Escassez hídrica; estiagem; água subterrânea; gestão hídrica; hidrologia.

^I Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

^{II} Universidade Vale Do Rio Verde – UNINCOR, Avenida Castelo Branco, 82, Chácara Das Rosas, Três Corações, MG, Brasil.

^{III} Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

^{IV} Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Baiano, Salvador, Bahia, Brasil.

^V Instituto Estadual de Florestas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

São Paulo. Vol. 27, 2024

Artigo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc0177r5vu27L2AO>

Introdução

O Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (World Water Development Report – WWDR, 2012) afirma que a água é o principal meio pelo qual a variação climática influi sobre o ecossistema terrestre e, portanto, sobre os meios de subsistência e de bem-estar das sociedades. As variações climáticas interferem na disponibilidade dos recursos hídricos, com alterações na distribuição das precipitações, na umidade do solo, no derretimento do gelo e glaciares, e nos fluxos das águas superficial e subterrânea (HIPT et al., 2019; AFSHAR; FAHMI, 2019). Outras consequências associadas à variação climática são os eventos hidrológicos extremos que, no caso das estiagens, tendem a ser mais severos e prolongados, o que pode impactar no uso em diversos setores, como doméstico, agropecuário e industrial (VÖRÖSMARTY, 2000; BATES et al., 2008; MAJONE et al., 2015; LU et al., 2019).

Várias regiões do planeta enfrentam severas crises hídricas, resultado do aumento da demanda para atender o consumo da população. Entretanto, apesar de a população mundial ter aumentado mais de três vezes no último século, o consumo de água aumentou cerca de nove vezes (BRITO; SILVA; PORTO, 2007). Esse aumento populacional, e o conseqüente aumento da demanda hídrica, atinge, anualmente, aproximadamente, cinco milhões de pessoas com limitações qualitativas da água, principalmente devido a restrições hídricas e má gestão deste recurso (WHO; UNICEF, 2017). De acordo com WWAP (2019), quatro bilhões de pessoas vivenciam situação de severa escassez hídrica em, pelo menos, um mês ao ano, o que, atualmente, representa dois terços da população mundial. Ademais, mais de dois bilhões de pessoas vivem em países com elevado estresse hídrico.

A crescente demanda por alimento, energia e consumo de bens industrializados trouxe à tona a necessidade de estudos associados à demanda hídrica, dos quais uma projeção de até 30% de aumento global é esperada até 2050 (e.g., WWAP, 2016; WWAP, 2019; SILVA; PEREIRA, 2019; ALCAMO; HENRICHES; RÖSCH, 2000). Neste contexto, uma ampla discussão sobre crises hídricas, e impactos social, econômico e ambiental vem sendo cada vez mais feita (PAUL; LAMA, 2019; OKI; QUIOCHO, 2020). Villar (2016) descreveu que o termo “crise hídrica” surgiu no início dos anos 1990, e, desta forma, foi ganhando destaque na literatura científica, nas organizações internacionais e na concepção das políticas de gestão hídrica.

Para Feitosa et al. (2009), as águas subterrâneas atuam, em muitos casos, como reserva estratégica em tempos de seca, servindo como importantes “reservatórios” naturais, permitindo a retirada de água em momentos em que as águas superficiais têm baixa disponibilidade hídrica. Como exemplo, a estiagem ocorrida no estado de São Paulo, entre 2013 e 2015, e que culminou em uma das piores crises hídricas conhecida no estado, resultou no aumento considerável de perfuração de poços tubulares para captação de água subterrânea (HIRATA et al. 2019; CONICELLI et al., 2021a). No caso da região metropolitana de São Paulo, onde mais de 90% do abastecimento público são realizados por água superficial, no ano de 2015, foi estimada a existência de mais de 13 mil poços tubulares privados, totalizando uma vazão superior a 11 m³/s, ou a demanda de 18% de

água subterrânea (BERTOLO et al., 2015; CONICELLI et al., 2021b).

Nos países desenvolvidos, a água subterrânea é bastante utilizada para uso urbano, suprindo mais que 70% da demanda, representando quase 100% na Dinamarca e mais de 50% nos Estados Unidos. No caso da Austrália, Armênia, Bélgica, Hungria, Geórgia, Dinamarca, Suíça e Alemanha, esses valores superam 70%, enquanto na Bulgária, Itália, Portugal, Ucrânia e França variam entre 50% e 70%. Em relação a outros usos, para irrigação, o consumo de água subterrânea excede 50% da demanda na maioria dos estados do oeste dos EUA. Na Espanha, já no início da década de 2000, um milhão de hectares eram irrigados com água subterrânea, correspondendo a cerca de 20% da demanda total (ZEKTSER; EVERETT, 2004).

No que se refere à disponibilidade hídrica no Brasil, o país está entre os que possuem as maiores reservas de água doce, com 13,8% do deflúvio médio mundial, resultando em disponibilidades hídricas per capita de 1.835 m³/hab./ano na bacia do Atlântico Leste, e de 628.938 m³/hab./ano na bacia Amazônica (FREITAS; SANTOS, 1999). Entretanto, mesmo com esta alta disponibilidade, há regiões que, devido às dimensões geográficas, diversidades climáticas e baixa concentração de água superficial, enfrentam sérios problemas de escassez hídrica, como é o caso das porções semiáridas da região nordeste e da região norte de Minas Gerais (MATTIUIZI, 2018).

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (2018), a partir de 2012, vários municípios do Brasil têm apresentado reduções de pluviosidade, esboçando um cenário de escassez hídrica. Esse fenômeno climático tem causado impactos na oferta de água para o abastecimento público e outros usos, como irrigação e geração de energia elétrica. Fayer et al. (2017) afirmaram que a crise hídrica no Brasil provocou 4.824 eventos de seca com danos humanos entre 2013 e 2016. Neste cenário, considerando a água subterrânea como reserva estratégica para suprir as necessidades dos usos múltiplos, observa-se no Brasil uma crescente utilização desse recurso hídrico.

Na bacia hidrográfica do rio São Francisco, especificamente na porção mineira, estudada nesse artigo, o Relatório Anual de Gestão e Situação dos Recursos Hídricos de Minas Gerais, do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2018), aponta o período de 2014 a 2017 como crítico. Neste intervalo, emergiram os problemas da gestão compartilhada dos recursos hídricos que foram provocados, em parte, por eventos extremos de secas em diversas regiões do Brasil, incluindo Minas Gerais. Neste relatório, segundo dados da Defesa Civil Estadual (MG), houve a publicação de 714 decretos de calamidade pública em decorrência da seca, no caso, em 276 municípios mineiros. Entre os anos de 2014 e 2017, a recorrente publicação de decretos foi verificada em 112 municípios. Vários municípios mineiros inseridos na bacia do rio São Francisco, como Abaeté, Araújo, Arcos, Carmo da Mata, Cláudio, Córrego Danta, Formiga, Iguatama, Itapeçerica, Lagoa da Prata, Morada Nova de Minas, Oliveira e Pará de Minas, entraram em estado de racionamento para o abastecimento de água no período supracitado (IGAM, 2018).

Carvalho et al. (2017) destaca que a sequência de períodos chuvosos ocorridos abaixo da média desde o ano de 2012 em Minas Gerais, associados à grande demanda de uso da água para abastecimento público e usos industriais concentrada nas grandes cidades,

tornaram a situação hídrica crítica em determinadas bacias, como a do rio Paraopeba, afluente do rio São Francisco. Esse dado é reforçado por ANA (2018), indicando que na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco foram observadas condições mais restritivas de disponibilidade hídrica. Os dados de estações pluviométricas indicaram que o ano 2017 foi considerado como “muito seco” a “extremamente seco”, com várias estações com dados entre os 3 piores já registradas no histórico de monitoramento.

No ano de 2019, o Relatório Gestão e Situação dos Recursos Hídricos de Minas Gerais apresentou um levantamento de dados de usos regularizados, sendo que, entre 2009 e 2018, foram contabilizadas 6.102 outorgas superficiais e 10.822 outorgas subterrâneas, num total de 16.924 outorgas concedidas, onde a proporcionalidade de água subterrânea é 28% superior à superficial (IGAM, 2019). Devido a essa questão, e com o propósito de estabelecer metas contingenciais para garantia dos usos múltiplos, em 2015, o Estado de Minas Gerais, por intermédio do Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH/MG, publicou a Deliberação Normativa nº 49 (MINAS GERAIS, 2015). A referida norma estabeleceu diretrizes e critérios gerais para a definição de situação crítica de escassez hídrica e estado de restrição de uso de recursos hídricos superficiais nas porções hidrográficas no estado (CARVALHO et al., 2017).

Dentro desse contexto, que este trabalho tem o objetivo de avaliar a relação entre demanda de uso de água subterrânea e ocorrência de escassez hídrica decorrente de eventos extremos de seca, entre os anos 2009 e 2018, na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

Metodologia

Área de estudo

A área de estudo compreende a porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco (BHRSF). O rio São Francisco tem uma extensão de 2.863 km, e sua bacia hidrográfica abrange uma área de drenagem de mais de 639.219 km², nascendo na Serra da Canastra, em Minas Gerais, até desaguar no Oceano Atlântico, na divisa de Sergipe e Alagoas (PRH-SF, 2016).

Em relação à climatologia, o Estado de Minas Gerais, devido à topografia, posição geográfica e aspectos dinâmicos da atmosfera, possui uma característica climática diversificada (MINUZZI et al., 2007). A distância do oceano contribui para a maior amplitude do ciclo diurno da temperatura do ar, enquanto a topografia, com elevações que variam entre 76 m e 2.300 m, influencia na direção e intensidade dos ventos, bem como na temperatura e umidade do ar (SILVA; REBOITA., 2013). Com relação às médias anuais, no centro-sul de MG, a temperatura mínima é cerca de 14°C, máxima de 27°C e média de 21°C, enquanto no noroeste do estado, os valores são 19°C, 31°C e 25°C, respectivamente. Como o estado está inserido em um clima de monção, onde quase 60% da precipitação ocorre na estação chuvosa, entre novembro e março, a precipitação no centro-sul pode atingir 900 mm, enquanto no noroeste do estado, é cerca de 400 mm. No inverno, entre abril e outubro, esses valores diminuem para 50 mm (centro-sul) e 25 mm (noroeste)

(MARENGO et al., 2012).

Quanto à abrangência da BHRSF no estado de Minas Gerais, a bacia equivale a aproximadamente metade da área total do estado, compreendendo as regiões norte, noroeste, central, oeste, além da metropolitana de Belo Horizonte (GUIMARÃES; REIS; LANDAU, 2010); e está subdividida em dez unidades de planejamento de gestão de recursos hídricos - UPGRH (Figura 1), sendo elas (MINAS GERAIS, 2020):

SF1 – Nascentes até confluência com o rio Pará (exclusive);

SF2 – Bacia do rio Pará;

SF3 – bacia do rio Paraopeba;

SF4 – Região do entorno do reservatório de Três Marias;

SF5 – Bacia do rio das Velhas;

SF6 – Região dos rios Jequitaí, Pacuí e trecho do rio São Francisco, de jusante da confluência com o rio Abaeté até jusante da confluência com o rio Urucuia (exceto os rios Urucuia e Paracatu);

SF7 – Bacia do rio Paracatu;

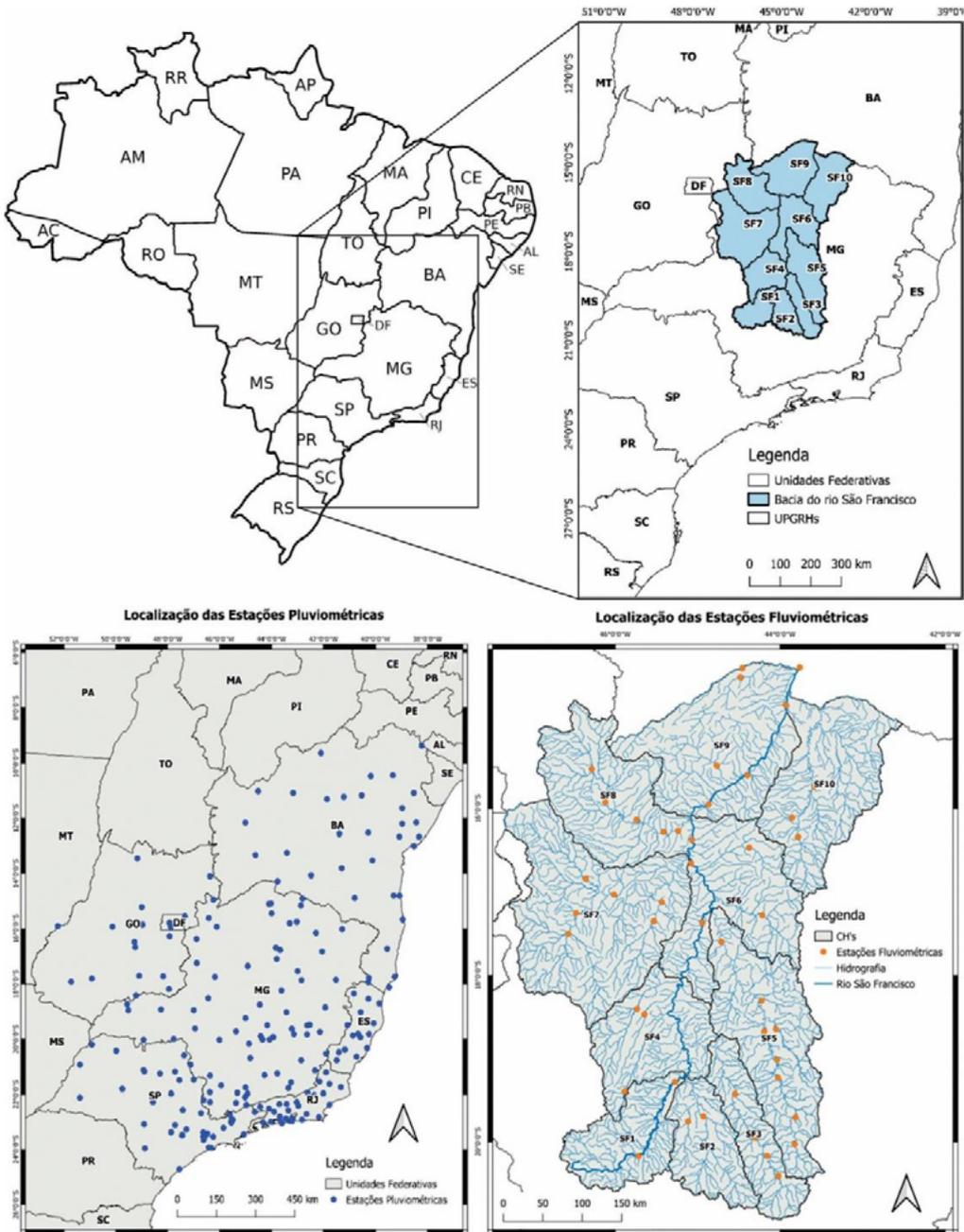
SF8 – Bacia do rio Urucuia e afluentes da margem esquerda do rio São Francisco entre os rios Paracatu e Urucuia;

SF9 – Rio São Francisco, de jusante da confluência com o rio Urucuia até montante da confluência com o rio Carinhanha;

SF10 – Bacia do rio Verde Grande.

Dentre os principais usos, o agropecuário é preponderante na UPGRH SF7, com volume de 81,32 m³/s outorgado para esta finalidade, enquanto o abastecimento público, e consumos industrial e minerário se destacam na UPGRH SF3, com volume outorgado de 22,90 m³/s e 11,10 m³/s, respectivamente. A UPGRH de maior demanda de água é a SF7, com 46% do uso total da porção mineira da BHRSF, seguida pela SF3 com 16% e SF5 com 10%.

Figura 1 – Localização das unidades de planejamento de gestão de recursos hídricos (UPGRH) na bacia hidrográfica do rio São Francisco (SF), no Estado de Minas Gerais. Abaixo, localizações das estações pluviométricas (esquerda) e fluviométricas (direita).



Fonte: Elaborado pelos autores com dados do IGAM (2019), INMET (2019) e Hidroweb (2019).

Materiais e métodos

O estudo foi desenvolvido em quatro etapas: 1) seleção de estações pluviométricas e fluviométricas de monitoramento; 2) análise da precipitação na bacia hidrográfica do rio São Francisco; 3) avaliação da situação crítica de escassez hídrica; e 4) análise de requerimentos de processos de uso de recursos hídricos. Na sequência, as relações entre os dados de cada etapa foram estabelecidas a fim de identificar se a ocorrência de escassez hídrica gerou incremento da demanda de requerimentos para o uso de água subterrânea.

1. Seleção de estações pluviométricas e fluviométricas de monitoramento

Para a análise de precipitação, ainda que a bacia hidrográfica de estudo esteja limitada ao estado de Minas Gerais, foram analisadas ao todo 837 estações pluviométricas do INMET, entre os anos de 2008 e 2018, sendo: 2008-2009 – 102; 2009-2010 – 102; 2010-2011 – 105; 2011-2012 – 101; 2012-2013 – 99; 2013-2014 – 94; 2014-2015 – 93; 2015-2016 – 86; 2016-2017 – 81 e 2017-2018 – 76 (Figura 1). Essas estações estão distribuídas no Estado de Minas Gerais e em estados limítrofes com Minas Gerais, localizadas nos estados da Bahia, Espírito Santo, Goiás, Rio de Janeiro, São Paulo, Distrito Federal. A partir da análise realizada, foram selecionadas 210 estações. A seleção de estações para além da área de estudo foi necessária devido ao método para espacializar as variáveis meteorológicas consideradas na análise, gerando uma melhor representatividade das bordas da porção hidrográfica estudada, uma vez que parte das estações apresentam falhas nos dados.

Destaca-se que foram utilizadas todas as 210 estações na análise de precipitação, tendo em vista as falhas nas séries de dados, sendo descartadas as estações com falhas na série histórica. Considerando que a anomalia de precipitação foi realizada para o período chuvoso e os dados são mensais, foram descartadas as estações que apresentaram pelo menos uma falha mensal.

Quanto às estações fluviométricas, estas foram selecionadas a partir do inventário da ANA, tendo como critérios as estações cuja área de abrangência gerasse maior representatividade de cada UPGRH, além de dados de vazão para o período de 2009 a 2018. O resultado foi a seleção de 45 estações fluviométricas localizadas ao longo da porção mineira da bacia do rio São Francisco (Figura 2). Entre 2015 e 2018, período com maior incidência de vazões críticas, foram identificadas falhas nas séries de dados de algumas estações fluviométricas, sendo descartadas aquelas que apresentaram mais de 15% de falhas no período de 10 anos. E, para as estações cuja substituição não era possível, dada a inexistência de outra na região, foram consideradas as estações cujos dados estavam sem falhas em períodos contínuos, ainda que por períodos mais curtos de dias no ano.

2. Análise da precipitação na bacia hidrográfica do rio São Francisco

Para a análise de precipitação, inicialmente, foi realizado o cálculo das Normais Climatológicas, que são valores médios mensais registrados em períodos de 30 anos consecutivos, sendo o período de referência os anos de 1981 a 2010, disponíveis em portal

do INMET (<https://portal.inmet.gov.br/normais>).

A anomalia de precipitação foi realizada comparando-se a precipitação de cada ano observado em relação a Normal Climatológica, que foi considerada como a variação (positiva ou negativa) em % da precipitação. Nos cálculos das anomalias, foram considerados os períodos chuvosos em cada ano, que, na área em estudo, são os meses entre outubro e março (SILVA; REBOITA, 2013). Os dados de precipitação foram obtidos junto ao INMET, disponíveis no portal do instituto (<https://bdmep.inmet.gov.br/>).

Destaca-se que as estações utilizadas para o cálculo de anomalia foram as mesmas estações usadas para espacialização da Normal Climatológica, variando a quantidade de estações de ano para ano, tendo em vista as falhas nas séries de dados. Foram descartadas as estações com pelo menos uma falha mensal no ano analisado.

Para as espacializações, tanto da Normal Climatológica quanto das anomalias de precipitação, utilizou-se a ferramenta de interpolação do software QGIS Versão 3.4.13. Os critérios adotados para definir os intervalos de classes foram, para a Normal Climatológica, o considerado pela própria ferramenta de interpolação, e, para as anomalias de precipitação, intervalos percentuais. O método de interpolação espacial foi o IDW - Inverse Distance Weighting, ou “interpolação pelo inverso do quadrado da distância”. Este método considera o valor de cada ponto ponderado pelo inverso da distância entre ele e o ponto de interesse, aonde pontos distantes contribuem com menor peso para o valor final (SHERMAN et al., 2011).

3. Avaliação da situação crítica de escassez hídrica

A avaliação da situação crítica de escassez hídrica foi realizada conforme os critérios estabelecidos pela Deliberação Normativa CERH/MG nº49, de 25 março de 2015, alterada pela DN CERH/MG nº50, de 09 de outubro de 2015, a qual dispõe sobre as diretrizes e critérios para a declaração de escassez no Estado de Minas Gerais.

Com base na referida deliberação, a situação crítica de escassez hídrica se configura quando a média das vazões diárias de 7 dias consecutivos observadas no posto de monitoramento fluviométrico de referência for inferior a 50% da $Q_{7,10}$ nas bacias hidrográficas do Estado, ou inferior a 70% da $Q_{7,10}$ para as bacias hidrográficas dos rios Jequitaiá, Pacuí, Urucuia, Pandeiros, Verde Grande, Pará, Paraopeba e Velhas (MINAS GERAIS, 2015). Esta condição de escassez estabelece o “Estado de Restrição de Uso”, no qual todos os usos devem ser reduzidos enquanto permanecer a condição de escassez.

Para a verificação de ocorrência da situação crítica de escassez hídrica, foram calculadas as vazões mínimas de sete dias consecutivos, associadas a um período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) das estações fluviométricas selecionadas. O cálculo da $Q_{7,10}$ foi realizado por meio do software SisCAH1.0 – Sistema Computacional para Análises Hidrológicas, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Viçosa, utilizando o modelo probabilístico de Weibull (SOUZA et al., 2009).

Em seguida, foi realizada uma análise dos dados disponíveis de vazão para o período entre 2009 e 2018, obtidos do banco de dados do portal Hidroweb, da ANA (<http://www.ana.gov.br/>).

snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao). Por fim, quantificou-se o número de dias em que a vazão das estações fluviométricas esteve em situação crítica de escassez hídrica, ou seja, abaixo de 50% ou 70% da $Q_{7,10}$, conforme bacia hidrográfica.

4. Análise de requerimentos de uso de recursos hídricos

Realizou-se, nesta etapa, o levantamento de dados das solicitações de outorgas superficiais e subterrâneas na bacia hidrográfica do rio São Francisco, porção mineira, durante os anos de 2009 a 2018. Os dados de outorgas superficiais foram utilizados para identificação dos quantitativos totais e seus percentuais na relação com os dados de outorgas subterrâneas.

Todos esses dados foram fornecidos pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, por meio do Sistema Integrado de Informações Ambientais – SIAM (<http://www.siam.mg.gov.br/siam/login.jsp>) com os seguintes critérios: (1) Base de dados: SIAM e (2) Data de formalização: de 2009 a 2018. Não foram considerados na análise os usos insignificantes, os requerimentos indeferidos, os cadastros não efetivados e as certidões vencidas. Foram contabilizados um total de 21.207 dados de requerimentos de atos autorizativos na bacia hidrográfica em estudo. Para fins de verificação da influência da anomalia de precipitação e da ocorrência de escassez hídrica nas solicitações de regularização pelo uso da água, foram realizadas avaliações conjuntas das informações, verificando os períodos em que ocorreram anomalias negativas de precipitação foram coincidentes com os períodos de escassez hídrica e, conseqüentemente, a interferência destes fatores nos requerimentos dos atos autorizativos subterrâneos.

Resultados e discussão

A distribuição espacial do padrão climatológico da área de estudo é apresentada na Figura 2 (mapa esquerdo em destaque), na qual é possível notar que o acumulado de precipitação no período chuvoso decresce de sudoeste para nordeste, com amplitudes de 824 mm a 1.187 mm. Os maiores valores são observados em parte das UPGRH SF1, SF2, SF3, SF4, SF5 e SF7 e os menores totais na porção nordeste das SF9 e SF10.

Em seguida, analisando por períodos chuvosos, foi feita uma comparação entre cada período e a média histórica, achando-se, então, a variação em % da precipitação, considerada aqui como anomalia (mapas menores a direita, Figura 2). No período chuvoso de 2008/2009 houve uma predominância de precipitação coincidente à Normal Climatológica. Entretanto, as SF1, SF2, SF3 e SF5 apresentaram precipitação acima da Normal, enquanto uma pequena parte das SF6, SF7 e SF8 estiveram abaixo da Normal, na faixa entre -20% e -30%. Em 2009/2010, em geral, a precipitação coincidiu com a Normal Climatológica ou ficou bem próxima a esta na maior parte da área em estudo (áreas em branco, Figura 2).

Destaca-se o período de 2010/2011, com anomalias positivas de 20% e 40% (áreas em azul). Na porção norte, na UPGRH SF9, médio São Francisco, foi onde ocorreram as maiores anomalias positivas. Em relação ao período chuvoso de 2011/2012, começou

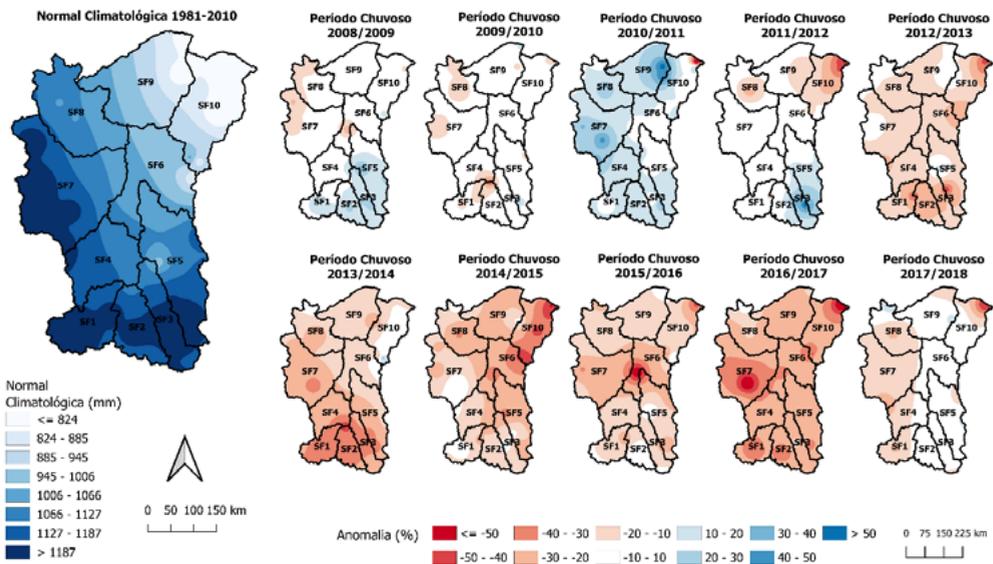
a ocorrer anomalias negativas mais acentuadas (áreas em vermelho), especialmente na SF10, bacia hidrográfica do rio Verde Grande (Figura 2).

A partir do período chuvoso subsequente, 2012/2013, iniciou-se um severo estado de escassez de chuva em toda a porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco, com uma evolução de anomalias negativas de chuva em praticamente todas as Unidades de Planejamento. O ápice aconteceu no período 2016/2017, onde praticamente toda a área da bacia apresentou regime de chuva abaixo da média, com faixas que variam entre -30% a -50% de anomalia, sendo as piores anomalias negativas registradas nas UPGRH SF7 e SF10.

Nos períodos chuvosos entre 2012/2013 e 2016/2017, ou seja, por 5 anos consecutivos, houve um considerável déficit de chuva. Almeida (2018) constatou uma redução de precipitações e das vazões em maior proporção, sendo que 2013 caracteriza o início da crise hídrica na bacia do rio São Francisco. Ademais, dados do IBGE (2017) demonstram a ocorrência de longos e anômalos períodos de estiagem pelo país, destacando os anos de 2013 e 2017 como os mais significativos. Esses períodos de seca prolongados e atípicos afetaram boa parte do território do país, traduzindo-se em uma crise hídrica intensa.

Figura 2 – Normal climatológica e anomalias de precipitação (variação em % em relação à média histórica), na porção mineira da bacia do rio São Francisco – períodos chuvosos 2008/2009 a 2017/2018.

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados do INMET (2019).



Na sequência, avaliou-se a ocorrência de situação crítica de escassez hídrica, conforme DN CERH 49/2015, de acordo com o disposto no item 3 desse artigo. O período severo de escassez de chuvas, iniciado na estação chuvosa de 2012-2013, gerou um reflexo

direto nas vazões, apresentando os primeiros registros de dias classificados como “Estado de Restrição de Uso” no ano de 2014. Dentro do período avaliado, ou seja, de 2009 a 2018, sendo considerado todos os meses do ano, os anos de 2014 a 2018 foram os que apresentaram situação de restrição de uso. Desta forma, na apresentação dos resultados, apenas os anos em estado de restrição foram discutidos.

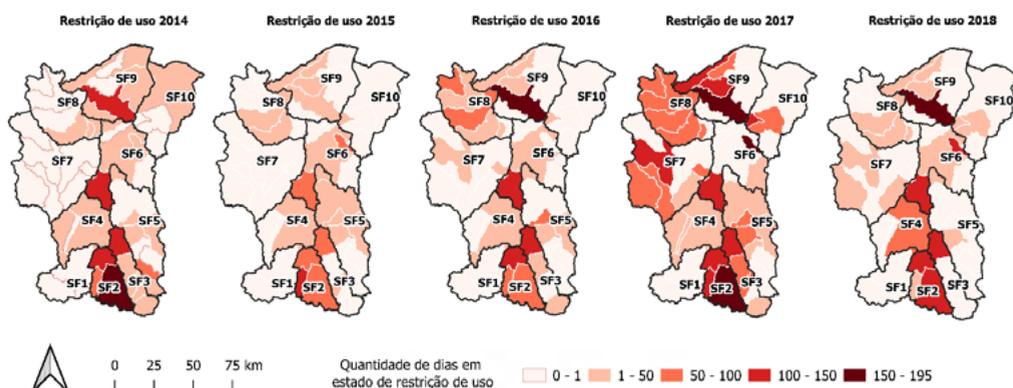
A Figura 3 apresenta os intervalos da quantidade de dias em “Estado de Restrição de Uso de Recursos Hídricos”, na porção mineira da bacia do São Francisco, por UPGRH, com base nas vazões inferiores a 50% e 70% da $Q_{7,10}$. O intervalo representa o número de dias em que a Estação permaneceu declarada como restrição, considerando a DN CERH 49/2015.

A UPGRH SF2 foi a que apresentou situação mais crítica no ano de 2014, ficando no intervalo correspondente a 150-195 dias em “Estado de Restrição de Uso”. A UPGRH que apresentou situação menos crítica foi a SF7, com intervalo de 0-1 dia. Em 2015, a UPGRH SF7 manteve o comportamento observado em 2014 e as outras UPGRHs apresentam dias em “Estado de Restrição de Uso”, mas com uma situação um pouco mais amena que anteriormente.

Em 2016, a situação é mais crítica nas SF9, SF8 e SF3. A UPGRH SF7, que até 2015 se mantinha no intervalo 0-1, passa a configurar na sua abrangência o intervalo 1-50. O ano de 2017 apresenta uma situação bem crítica em todas as UPGRHs, tendo como destaque SF2, SF6 e SF9. A exceção permanece na SF1, que apresenta um comportamento estável em todos os anos.

No ano de 2018, SF9 continua a apresentar o comportamento mais crítico, como nos anos de 2016 e 2017. As demais UPGRHs continuam nos mesmos intervalos de dias em “Estado de Restrição de Uso”, embora seja possível notar alguma melhora, em comparação com o ano de 2017.

Figura 3 – Intervalos da quantidade de dias em estado de restrição de uso para os anos de 2014 a 2018, na porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco.



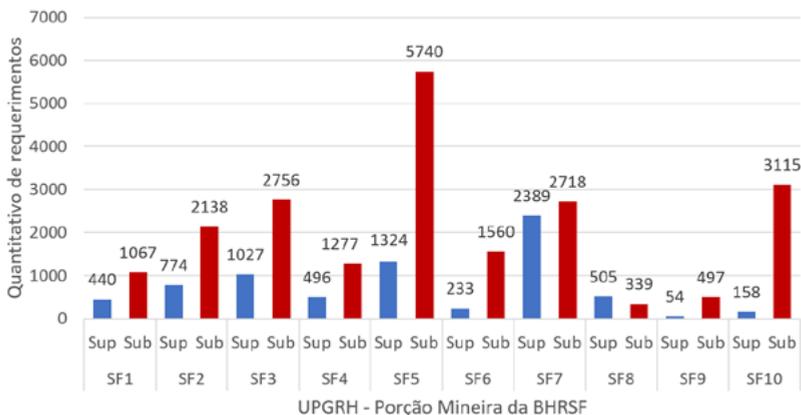
Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados do INMET (2019).

Logo após, foi realizada a análise dos requerimentos de uso de recursos hídricos na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco entre os anos de 2008 e 2018. A avaliação foi baseada somente nas solicitações de regularização, não sendo considerados nessa avaliação os volumes regularizados.

De forma geral, há uma prevalência de pedidos de uso de água subterrânea em relação às águas superficiais. O predomínio de solicitações de uso de água subterrânea comparado à água superficial se mantém em quase todas as UPGRHs quando é avaliado o quantitativo de requerimentos, com exceção de SF7 e SF8, onde o uso de água superficial se equivale ao uso de água subterrânea (Figura 4). Esse fato é corroborado pelo Relatório Anual de Gestão e Situação dos Recursos Hídricos de Minas Gerais, onde, até o ano de 2017, há uma tendência de aumento do uso de água subterrânea, sendo o quantitativo na ordem de 2.441 outorgas vigentes superficiais e 5.631 outorgas vigentes subterrâneas (IGAM, 2018). Verifica-se que, no geral, o número de outorgas para uso de água subterrânea superou em mais de 50% o de água superficial, naquele período, considerando o quantitativo de solicitações, não adentrando no volume outorgado (Figura 5).

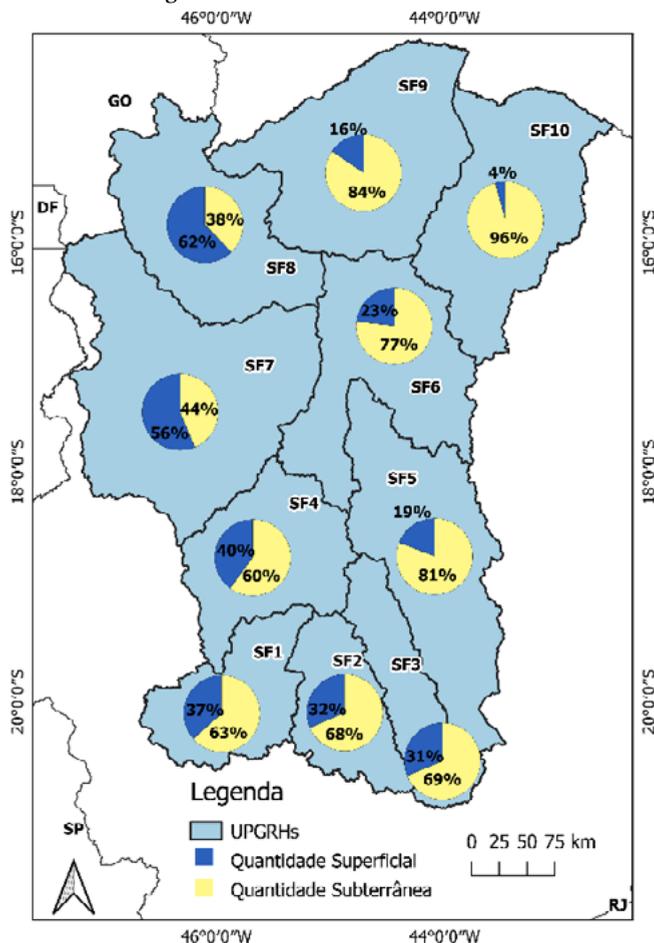
A explicação para esse fenômeno está relacionada ao período de anomalias negativas de precipitação (entre -30% a -50%), principalmente entre 2014 e 2018, onde a média das vazões diárias de vários rios da região ficaram inferiores a 50% da $Q_{7,10}$. Essa condição estabeleceu o “Estado de Restrição de Uso”, no qual todos os consumos de água superficial foram reduzidos. Em boa parte da região, há ocorrência de aquíferos (cársticos, como sedimentares) com boa qualidade e quantidade de água reservada. Essa condição pode resultar, como consequência, no aumento do uso da água subterrânea como fonte hídrica alternativa (HIRATA et al. 2019; CONICELLI et al., 2021b). Boa parte dos aquíferos está sob condição de confinamento, o que não apresentaria, em parte, conexão hidráulica com águas superficiais locais, garantindo a demanda hídrica dos usuários, sem afetar o regime hídrico superficial.

Figura 4 – Quantitativo de requerimentos de uso de recursos hídricos para água superficial (azul) e subterrânea (vermelho) na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco entre 2008-2019.



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados do SIAM (2019).

Figura 5 – Tendência de aumento de quantitativo de captações de água subterrânea até o ano de 2017.



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados de IGAM (2018).

Sendo assim, realizou-se a análise integrada, entre 2009 e 2018, das seguintes variáveis (Tabela 1): (1) anomalias de precipitação mínimas, consideradas como condição mais crítica; (2) dias de ocorrência de restrição de uso (valor máximo no intervalo); e (3) quantitativo de solicitações de autorizações para uso de águas subterrâneas (percentual de requerimentos de captações de água subterrânea em relação ao solicitado).

Essa avaliação foi realizada considerando-se, na situação específica de restrição de uso de água superficial, conforme DN CERH 49/2015, as ocorrências de chuvas abaixo da normal climatológica, onde haveria uma possível procura por uma fonte hídrica alternativa. Nesse caso, o quantitativo de solicitações de captações para água subterrânea seria a fonte hídrica alternativa analisada.

Ao avaliar as ocorrências de chuva abaixo da Normal Climatológica, o número máximo de dias em escassez hídrica e o percentual de requerimentos de água subterrânea

para cada UPGRH, nota-se uma prevalência de requerimentos em períodos de maiores dias em escassez hídrica. O início do período crítico para a bacia quanto à anomalia de precipitação foi em 2012/2013, sendo ampliada nos períodos posteriores, chegando-se à pior situação no período 2016/2017. Considerando esta análise, quanto à situação crítica de escassez hídrica, os períodos de restrição de uso se deram a partir de 2014.

E, tendo em vista que os períodos críticos de escassez hídrica ocorreram a partir de 2014, as análises de requerimentos de água subterrânea também foram consideradas a partir de 2014, o ano subsequente ao início do período crítico de anomalias negativas (2012/2013). Observa-se que seis das dez UPGRHs que compõem a bacia hidrográfica do rio São Francisco, SF1, SF2, SF3, SF4, SF5 e SF6, apresentaram aumento de requerimentos. Nas SF1, SF2, SF3, SF4, SF8, SF9 e SF10 a mesma tendência ocorreu no ano de 2018, após o período chuvoso 2016/2017, considerado como pior situação da bacia, com anomalias mais negativas. Observa-se que as condições mais críticas estão destacadas em azul na Tabela 1.

Tabela 1 – Anomalias mínimas, ocorrências de dias máximos de escassez hídrica por UPGRH e percentual de requerimentos para uso da água subterrânea em relação a superficial por UPGRH (período 2009 e 2018). Destaque em azul para o início do período mais crítico de escassez hídrica.

UPGRH/ ANO	SF1			SF2			SF3			SF4			SF5		
	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)
	Mín	Máx		Mín	Máx		Mín	Máx		Mín	Máx		Mín	Máx	
2009	-10%	1	66%	-10%	1	71%	-10%	1	68%	-10%	1	57%	-30%	1	80%
2010	-30%	1	70%	-40%	1	74%	-30%	1	69%	-40%	1	62%	-20%	1	74%
2011	-10%	1	70%	-10%	1	71%	-10%	1	67%	10%	1	74%	-10%	1	80%
2012	-20%	1	64%	-20%	1	71%	-10%	1	71%	-10%	1	85%	-10%	1	78%
2013	-40%	1	55%	-40%	1	59%	-40%	1	70%	-30%	1	64%	-50%	1	81%
2014	-40%	50	72%	-50%	195	75%	-50%	150	76%	-50%	50	67%	-40%	100	84%
2015	-30%	50	78%	-30%	150	83%	-40%	100	80%	-30%	50	66%	-40%	50	87%
2016	-30%	50	71%	-30%	150	79%	-30%	150	78%	-30%	50	78%	-60%	100	81%
2017	-50%	50	77%	-40%	195	77%	-30%	150	76%	-40%	50	68%	-40%	100	86%
2018	-30%	100	91%	-10%	150	81%	-20%	150	78%	-30%	100	90%	-20%	50	87%
UPGRH/ ANO	SF6			SF7			SF8			SF9			SF10		
	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)	Anomalia da precipitação	Situação de Escassez	Requerimento uso de água subterrânea (% em relação ao total)
	Mín	Máx		Mín	Máx		Mín	Máx		Mín	Máx		Mín	Máx	
2009	-30%	1	89%	-30%	1	54%	-20%	1	44%	-20%	1	90%	-20%	1	94%
2010	-10%	1	85%	-20%	1	47%	-20%	1	31%	-20%	1	91%	-20%	1	95%
2011	-10%	1	83%	-10%	1	52%	-10%	1	33%	10%	1	97%	-60%	1	91%
2012	-20%	1	83%	-10%	1	34%	-30%	1	51%	-20%	1	100%	-50%	1	95%
2013	-30%	1	73%	-30%	1	49%	-20%	1	45%	-20%	1	92%	-50%	1	94%
2014	-30%	150	87%	-40%	1	43%	-30%	50	38%	-30%	150	92%	-30%	50	92%
2015	-50%	100	88%	-30%	1	46%	-40%	50	30%	-30%	50	82%	-60%	50	95%
2016	-60%	150	92%	-10%	50	59%	-30%	100	38%	-20%	195	80%	-50%	50	96%
2017	-40%	195	91%	-70%	150	64%	-30%	100	25%	-30%	195	86%	-60%	150	99%
2018	-20%	150	91%	-40%	50	65%	-30%	50	53%	-20%	195	100%	-50%	50	99%

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados do INMET (2019), Hidroweb (2019) e SIAM (2019).

Conclusões

A bacia hidrográfica do rio São Francisco, na porção no estado de Minas Gerais, de acordo com a análise de anomalia de precipitação a partir do período chuvoso 2012/2013, iniciou um severo estado de escassez de chuva, que persistiu nos períodos chuvosos seguintes, sendo a pior condição em 2016/2017. Na avaliação da caracterização da situação de escassez hídrica, o período crítico iniciou-se no ano de 2014 abrangendo as 10 unidades de planejamento de gestão de recursos hídricos (UPGRH) existentes na bacia hidrográfica. Porém, o destaque, no período avaliado, foi o ano de 2017, que, de uma forma geral, se mostrou mais crítico.

Esta avaliação demonstra a relação de causa e consequência diante da influência do regime de precipitações e a situação de restrição imposta pela DN CERH 49/2015. Em outras palavras, em períodos em que as chuvas estiveram abaixo da Normal Climatológica, o ano seguinte apresentou maiores registros de dias em estado de restrição de uso (escassez hídrica), tendo como consequência o aumento de requerimentos de uso de água subterrânea (com maior ápice entre os anos de 2014 e 2018).

O estudo evidenciou que as águas subterrâneas têm sido fonte de água para os diversos usos na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco e que há o aumento de requerimentos para seu uso em períodos críticos, de pouca chuva e situação crítica de escassez hídrica. A constatação deste trabalho reforça a importância de um monitoramento mais detalhado do ciclo da água, incluindo o monitoramento qualitativo e quantitativo das diversas unidades aquíferas da região.

Referências

ALCAMO, J.; T. HENRICHES; T. RÖSCH. World water in 2025: Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century, Kassel World Water Ser. Rep. 2, Cent. for Environ. Syst. Res., Univ. of Kassel, Kassel, Germany. 2000.

AFSHAR, N.R.; FAHMI, H. Impact of climate change on water resources in Iran. *Int J Energ Water Res* 3, 55–60 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42108-019-00013-z>. Acesso em: 03 de maio de 2020.

ALMEIDA, C. A. P. Prospecção da crise hídrica por meio da modelagem hidrológica no rio São Francisco. Tese (doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal de Sergipe. Sergipe, p. 235. 2018.

ANA. Agência Nacional das Águas. HIDROWEB v1.0.0.19. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf# Acesso em: 05 jun. 2019.

ANA. Agência Nacional das Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2018. 72p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/>

ana.gov.br/portal/publicacao/Conjuntura2018.pdf Acesso em 02 set. 2019.

BATES, B.C.; Z.W. KUNDZEWICZ, S. WU, J.P. Palutikof, Eds., 2008: Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

BERTOLO, R.; HIRATA, R.; CONICELLI, B.; SIMONATO, M; PINHATTI, A.; FERNANDES, A. Água subterrânea para abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo: é possível utilizá-la em larga escala? Revista DAE, v. 63, p. 6-17, 2015.

BRITO; L. T. L; PORTO, E. R; SILVA, A. S. Disponibilidade de água e gestão dos recursos hídricos. Embrapa Semi Árido. Petrolina. PE. 2007. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPATSA/36533/1/OPB1514.pdf>.

CARVALHO, J. D.; MELO, M. C.; PINHEIRO, L. R. R.; SPUZA, P. S. Metodologia utilizada para o monitoramento hidrometeorológico referente ao abastecimento público da Região Metropolitana de Belo Horizonte - RMBH no ano de 2015. 3º Congresso Internacional RESAG. 15 p. 2017. Disponível em: <http://www.resag.org.br/congressoresag2017/anais/trabalhos/aprovado?q=monitoramento>. Acesso em 10 ago. 2019.

CONICELLI, B.; HIRATA, R.; GALVÃO, P; BERNARDINO, M.; SIMONATO, S.; ABREU, M. C.; ARANDA, N.; TERADA, R. Determining groundwater availability and aquifer recharge using GIS in a highly urbanized watershed. Journal of South American Earth Sciences, v. 106, 2021a.

CONICELLI, B.; HIRATA, R.; GALVÃO, P; ARANDA, N.; TERADA, R.; GUTIÉRREZ, O. J. G. Groundwater governance: The illegality of exploitation and ways to minimize the problem. An Acad Bras Cienc 93: e20200623. DOI 10.1590/0001-3765202120200623. 2021b.

FAYER, C. G.; PEREIRA C. J.; RIBEIRO, B.R.; BOLTARI JUNIOR, N.; FERREIRA, M. P. Crise Hídrica: Evolução dos Decretos Estaduais Sobre Escassez Hídrica em Minas Gerais. III Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul. 10., 2017. Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF. Juiz de Fora, MG.

FEITOSA, F. A. C., MANOEL FILHO, J., FEITOSA, E. C., & DEMETRIO, J. G. A. (2008). Hidrogeologia: conceitos e aplicações (3. ed.). Rio de Janeiro: CPRM/LABHID.

FREITAS, M. A. V. de; SANTOS, A. H. M. Importância da água e da informação hidrológica. In: FREITAS, M. A. V. de. (Ed.). O estado das águas no Brasil: perspectivas de gestão e informações de recursos hídricos. Brasília, DF: ANEEL/MME/ MMA-SRH/OMM, 1999. p. 13-16. il.

GUIMARÃES, D.P; REIS, R.J.; LANDAU, E.C. Índices pluviométricos em Minas Gerais. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 30, 88 p. 2010.

HIPT, F. O.; DIEKKRÜGER, B.; STEUP, G.; YIRA, Y.; HOFFMANN, T.; RODE, M.; NÄSCHEN, K. Modeling the effect of land use and climate change on water resources and soil erosion in a tropical West African catchment (Dano, Burkina Faso) using SHETRAN. Science of The Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.351>. pp. 431-445. 2019. Acesso

em: 03 de maio de 2020.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. Realizado por: Instituto Trata Brasil, 19 p. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/21636-munic-2017-48-6-dos-municipios-do-pais-foram-afetados-por-secas-nos-ultimos-4-anos>. Acesso em 10 de maio 2020.

IGAM. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Relatório Anual de Gestão e Situação dos Recursos Hídricos de Minas Gerais -2014/2017. Belo Horizonte-MG, 135p. 2018.

IGAM. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS Gestão e situação das águas de Minas Gerais 2019. Belo Horizonte-MG, 160p. 2019.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/normais/>. Acesso em: 10 de abril 2019.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 20 de junho 2019.

LU, S.; BAI, X.; LI, W.; WANG, N. Impacts of climate change on water resources and grain production. *Technological Forecasting & Social Change*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.015>. pp. 76-84. 2019.

MAJONE, B.; VILLA, F.; DEIDDA, R.; BELLIN, A. Impact of climate change and water use policies on hydropower potential in the south-eastern Alpine region. *Science of the Total Environment*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.009>. p.16. 2015.

MARENCO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; SILVA DIAS, P. L.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Review recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, v. 32, n. 1, p. 1-21, 2012.

MATTIUZI, C. D. P. Gestão Integrada dos Recursos Hídricos: Alocação Otimizada com Uso Conjunto de Água Superficial e Subterrânea para Redução de Escassez Hídrica na Bacia do Rio Santas Maria/RS. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 93 f. 2018.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa do CERH n. 36, de 23 de dezembro de 2010. Padroniza a utilização dos nomes, siglas e códigos das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, dezembro, 2010.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa do CERH n. 49, de 25 de março de 2015. Define diretriz e critérios gerais para a definição de situação crítica de escassez hídrica e estado de restrição

de uso de recursos hídricos superficiais nas porções hidrográficas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, agosto, 2015.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa do CERH n. 66, de 17 de novembro de 2020. Estabelece as Unidades Estratégicas de Gestão do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, novembro, 2020.

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; BARBOSA, E. M.; MELO JÚNIOR, J. C. F. Climatologia do comportamento do período chuvoso da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol.22 n.3 São Paulo Dec. 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862007000300007> Acesso em: 20 de ago. 2019.

OKI, T.; QUIOCHO, R. E. Economically challenged and water scarce: identification of global populations most vulnerable to water crises. *International Journal of Water Resources Development*. 36:2-3, p. 416-428, 2020. DOI: 10.1080/07900627.2019.1698413. 2020. Acesso em: 03 de maio de 2020.

PAUL, S.; LAMA, W. *Water Use and Its Crisis in the World*. Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71062-4_93-1. p. 10. 2019. Acesso em: 08 de maio de 2020.

PRH-SF. *Resumo Executivo do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025*. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Alagoas, 300p. 2016.

SHERMAN G.; SUTTON T.; BLAZEK R.; HOLL S.; DASSAU O.; MORELY B; MITCHELL T.; LUTHMANN L. 2011. *Quantum GIS User Guide - Version 1.7 "Wroclaw"*. Acesso em: "DATA". Disponível em: <http://download.osgeo.org/qgis/doc/manual/qgis-1.7.0_user_guide_en.pdf>http://download.osgeo.org/qgis/doc/manual/qgis-1.7.0_user_guide_en.pdf. Acesso em 19 ago. 2019.

SILVA, E. D.; REBOITA, M. S. Estudo da Precipitação no Estado de Minas Gerais – MG. *Revista Brasileira de Climatologia* 3, 120-136, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v13i0.33345>. Acesso em 10 maio 2020.

SILVA, J. F. A.; PEREIRA, R. G. Panorama global da distribuição e uso de água doce. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.10, n.3, p.263-280, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.003.0023>. Acesso em: 29 de abril de 2020.

SOUSA, H. T.; PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; CECON, P. R.; SOUZA, J. R. C. *SisCaH 1.0: Sistema computacional para análises hidrológicas*. Brasília: Agência Nacional das Águas – ANA, 2009. 59 p.

VILLAR, P. C. As Águas Subterrâneas e o Direito à Água em um Contexto de Crise. *Ambiente & Sociedade*, vol. XIX, núm. 1, enero-marzo, Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade Campinas, Brasil. p. 83-100. 2016.

VÖRÖSMARTY, C. J.; GREEN, P.; SALISBURY, J.; RICHARD B. *Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth*. American Association for the Advancement of Science. Lammars Source: Science, New Series, Vol. 289, No. 5477, pp. 284-288. 2000.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) AND THE UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF). Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines. Geneva, 2017. Disponível em: https://www.unicef.org/publications/index_96611.html. Acesso em: 27 de abril de 2020.

WWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME). The United Nations World Water Development Report 2012. Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, UNESCO. Disponível em: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr4-2012/>.

WWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME). The United Nations World Water Development Report 2016. Wastewater and Jobs. Paris, UNESCO. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000243938>. Acesso em: 29 de abril de 2020.

WWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME). The United Nations World Water Development Report 2019. Leaving No One Behind. Paris, UNESCO. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306>. Acesso em: 03 de maio de 2020.

WWWDR4 (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT) Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos. PROGRAMME. Resumo histórico. Programme Office on Global Water Assessment Division of Water Sciences, UNESCO. Colombella, Perugia, Italy, 6 p. 2012.

ZEKTSER, I. S.; EVERETT, L. G. Groundwater Resources of The World and Their Use. IHP-VI, series on Groundwater No. 6. Paris. 342 p. 2004.

Jeane Dantas de Carvalho

✉ jeane.carvalho@meioambiente.mg.gov.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7015-8159>

Submetido em: 15/09/2020

Aceito em: 13/01/2024

2024;27:e00177

Marília Carvalho de Melo

✉ prof.marilia.melo@unincor.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9789-2169>

Paulo Galvão

✉ hidropaulo@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7183-0368>

Wezer Lismar Miranda

✉ wezer.miranda@ifbaiano.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4173-4364>

Breno Esteves Lasmar

✉ brenolasmar@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5825-1166>

Agua Subterránea en el contexto de escasez hídrica en la cuenca del Río São Francisco (MG)

Jeane Dantas de Carvalho
Marília Carvalho de Melo
Paulo Galvão

Wezer Lismar Miranda
Breno Esteves Lasmar

Resumen: En la última década, la escasez hídrica en Minas Gerais afectó la disponibilidad hídrica superficial, direccionando a los usuarios al uso de aguas subterráneas como fuente alternativa. La cuenca del río São Francisco es una de las más importantes entre las que bañan el estado, tanto por su alcance espacial como por la preponderancia del uso de aguas subterráneas. Debido a la escasez hídrica resultante de sequías extremas entre 2009 y 2018, presentó una tendencia de aumento en requerimientos de uso de aguas subterráneas. El objetivo de este artículo fue evaluar la correlación entre el aumento de estos requerimientos y los períodos de anomalías pluviométricas negativas en relación a la situación crítica de escasez hídrica, definida por la Resolución Normativa CERH/MG 49/2015. Se observó una relación directa entre las anomalías de precipitación negativa y la escasez de agua, y el aumento de los requerimientos para uso de aguas subterráneas, especialmente entre 2014 y 2018.

São Paulo. Vol. 27, 2024

Artículo original

Palabras-clave: Escasez de agua; sequía; aguas subterráneas; gestión del agua; hidrología.

Groundwater in water scarcity context in the São Francisco River Basin (MG)

Jeane Dantas de Carvalho
Marília Carvalho de Melo
Paulo Galvão

Wezer Lismar Miranda
Breno Esteves Lasmar

Abstract: In the last decade, water scarcity in Minas Gerais affected surface water availability, leading users to privilege the use of groundwater as an alternative source. The São Francisco River basin is one of the most important watersheds of the state, both for its spatial occurrence and for the preponderance of groundwater use. Due to water scarcity resulting from extreme drought events between 2009 and 2018, there was an increasing requirement trend for licensing of groundwater abstractions. The objective of this paper was to evaluate the correlation between the increase in these requirements and periods of negative rainfall anomalies in relation to critical situations of water scarcity, defined by the State's Normative Deliberation CERH/MG 49/2015. A direct relationship between negative rainfall anomalies and water scarcity and the increased need for groundwater use was observed, especially in the years between 2014 and 2018.

São Paulo. Vol. 27, 2024

Original Article

Keywords: Water scarcity; drought; groundwater; water management; hydrology.