

Artigos

A Condição de Exploração de Água Subterrânea em Minas Gerais à Luz dos Critérios da Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH 05/2017

The Groundwater Exploitation Condition in Minas Gerais in the Light of the Criteria in the Normative Deliberation COPAM-CERH 05/2017

Maricene Menezes de Oliveira Mattos Paixão³ (in memoriam); Jean Lucca Gonzaga de Carvalho²; Luana Prates²; Paulo Galvão^{2,3} ✉

¹ Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), Belo Horizonte, MG

² Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG

³ Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG

✉ jean.geo12@gmail.com, hidropaulo@gmail.com, pratlana@gmail.com

Palavras-chave:

Deliberação Normativa.
Otobacia.
Água subterrânea.
Superexploração.

Keywords:

Normative Deliberation.
Otobasin.
Groundwater.
Overexploitation.

Revisado por pares.

Recebido em: 28/05/2019.

Aprovado em: 02/09/2019.

Resumo

A superexploração da água subterrânea traz uma série de consequências nas mais diversas escalas espacial e temporal devido à complexidade do funcionamento dos sistemas aquíferos e sua interação com o meio físico. No Brasil, a falta de uma legislação específica e consolidada, que discipline o uso das águas subterrâneas, tem contribuído para este problema. Visando aprimorar a gestão dos recursos hídricos e enfrentar os desafios frente ao controle e manutenção das águas subterrâneas no estado de Minas Gerais, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH N° 05, de 14/09/2017 (DN 05/2017), estabelece diretrizes e procedimentos para definir áreas de restrição e controle do uso das águas subterrâneas. O artigo tem como objetivo o levantamento preliminar das "Áreas de Restrição e Controle em Avaliação", devido à superexploração no estado de Minas Gerais, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela DN 05/2017. A partir da análise da distribuição espacial das outorgas de água subterrânea vigentes e cadastros de uso insignificantes nas otobacias de nível 6 e 8 do estado, foram definidas 215 "Áreas de Restrição e Controle em Avaliação" dentre as 15.352 otobacias analisadas. Identificadas estas áreas, cabe ao órgão gestor estabelecer a ordem de prioridade para execução dos estudos que venham ou não confirmar a superexploração, conforme previsto nos artigos 11 e 12 da DN 05/2017 e, se necessário, adotar as medidas de controle necessárias.

Abstract

Groundwater overexploitation brings a series of consequences in the most diverse spatial and temporal scales due to the complex functioning of aquifer systems and their interaction with the physical environment. The lack of specific and consolidated legislation governing the use of groundwater has contributed to this issue in Brazil. To improve the water resource managements and face the challenges related to groundwater control and maintenance in the state of Minas Gerais, the COPAM-CERH Normative Deliberation No. 05, dated 09/14/2017 (DN 05/2017), establishes guidelines and procedures for defining groundwater use restriction and control areas. The goal of this paper is the preliminary survey of "Restriction and Control in Evaluation Areas" due to overexploitation in the state of Minas Gerais, according to the guidelines established by DN 05/2017. Based on analysis of spatial distribution of existing well grants and groundwater use insignificant registries in the otobasins of level 6 and 8 of the state, 215 "Restriction and Control in Evaluation Areas" were defined, among the 15,352 otobasins analyzed. Once these areas have been identified, it is up to the managing agency to establish the order of priority for carrying out studies that may or may not confirm overexploitation, indicated in Articles 11 and 12 of the Deliberation and, adopt the necessary control measures, if necessary.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i4.29559>

1. INTRODUÇÃO

A exploração de água subterrânea implica na modificação do seu padrão de fluxo em um aquífero, de modo a direcionar a água para obras de captação (poços tubulares, cacimbas, drenos e galerias), gerando o rebaixamento do nível d'água e do nível piezométrico. A água extraída passa a ser uma água não mais disponível para as áreas de descarga natural (CUSTODIO

& SILVA JUNIOR, 2008).

A superexploração implica em um cenário em que, por alguns anos, a taxa média de exploração de um aquífero é maior ou próxima à taxa de recarga média (Feitosa et al. 2008). Impactos indesejáveis podem acontecer em um aquífero, como econômico (níveis d'água excessivamente baixos e aumento de custos de energia); geotécnico (colapso ou subsidência de ter-

renos, danos em estradas, prédios públicos e privados ou dutos enterrados); social e legal (danos aos consumidores); ambiental (contaminação do aquífero, resultando em água de baixa qualidade) e alteração do fluxo de base do rio (DOMENICO, 1972; SOPHOCLEOUS, 1997; 1998; 2000; CUSTODIO, 2002).

A falta de legislação específica e consolidada que discipline o uso da água subterrânea tem contribuído para os problemas de superexploração. Um dos efeitos mais diretos e deletérios da superexploração é a subsidência de solos situados sobre os aquíferos. Quando ocorre em áreas com grande ocupação, as consequências podem ser devastadoras, como na cidade do México, onde a taxa de subsidência anual está em torno de 7 cm (ORTIZ-ZAMORA & ORTEGA-GUERRERO, 2010).

No Brasil, no estado de São Paulo, onde estudos e gestão integrada de recursos hídricos são mais avançados, a deliberação CRH N° 052, de 15/04/2005 instituiu, no âmbito do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos, diretrizes e procedimentos para a definição de áreas de restrição e controle da captação e uso das águas subterrâneas. A definição de “Áreas Potenciais de Restrição e Controle” é feita com base em dois critérios, considerando-os isolados ou em conjunto: 1) quantitativo (densidade de poços, vazão total explorada, escoamento básico e específico); 2) qualitativo (vulnerabilidade natural, qualidade da água, denúncias e cadastro de fontes de poluição). Com base nesses critérios o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE) definiu algumas regiões que existem restrição e controle de captações e usos de água subterrânea; essas áreas estão nos municípios de Ribeirão Preto, Jurubatuba, Carapicuíba e Monte Azul Paulista.

Na cidade de Cajamar, também em São Paulo, no ano de 1986, formou-se uma cratera de 31 m de diâmetro por 13 m de profundidade (IPT, 1987; NAKAZAWA *et al.*, 1987; PRANDINI *et al.*, 1987), havendo, desde então, recorrência na região, como em 1999, onde parte das edificações de uma moderna fábrica passou por danos estruturais advindos de afundamentos em suas fundações (TOMINAGA, SANTORO, AMARAL, 2009). Na região metropolitana de Recife, casos de subsidência e colapso também são comuns, assim como o avanço da cunha salina (CHATTON *et al.* 2016). Tanto em Recife como em Cajamar, as ocorrências estão relacionadas ao rebaixamento acentuado do nível d'água subterrânea.

Em Minas Gerais, a concentração de poços em áreas com pouca disponibilidade hídrica superficial (especialmente nas regiões cársticas) pode gerar problemas hídricos imediatos. Exemplos como rebaixamentos acentuados do nível freático, subsidências de solos, ou decréscimos das vazões em nascentes ou de níveis de base de rios são comuns, assim como a diminuição da qualidade das águas subterrânea e superficial (Assunção, 2019). Alguns desses problemas são verificados na cidade de Sete Lagoas, onde já foram documentados, pelo menos, 17 casos de subsidência ou colapso desde 1988, sendo que o bombeamento em mais de 50 anos resultou em rebaixamentos do nível d'água, no centro da cidade, de mais de 30 m, assim como lagoas, que antes eram perenes, se tornaram intermitentes (GALVÃO *et al.* 2015; 2017; Assunção, 2019).

Com o objetivo de aprimorar a gestão dos recursos hídricos e enfrentar os desafios frente ao controle e manutenção das águas subterrâneas em Minas Gerais, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH N° 05, de 14/09/2017, doravante DN 05/2017 (<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=45258>), estabelece diretrizes e procedimentos para a definição de áreas de restrição e controle do uso das águas subterrâneas (MINAS GERAIS, 2017).

“Área de Restrição e Controle” (ARC) é aquela em que existe a necessidade de disciplinar as intervenções em águas subterrâneas em termos qualitativo (e.g. superexploração ou áreas sob a influência de captação subterrânea) e quantitativo (e.g. contaminações antrópicas, considerando Valores Máximos Permitidos para cada uso de água, previstos nas resoluções CONAMA), visando sua proteção, conservação, recuperação e uso sustentável. A ARC é classificada em “Área de Restrição e Controle em Avaliação” (ARCA) e “Área de Restrição e Controle Confirmada” (ARCC). É considerada ARCA aquela sob influência de captação subterrânea onde o volume total explorado for, por no mínimo 4 meses consecutivos, superior ao volume explorável estimado, apresentando indícios distintos de superexploração. Os detalhes podem ser melhor consultados nas deliberações normativas COPAM-CERH/MG n° 02, de 08/09/2010, e CERH n° 49, de 25/03/2015, e Resolução CONAMA n° 396, de 03/04/2008. No caso da ARCC, é considerada a área em que o aquífero livre, devido à superexploração, tenha o volume captado superior a 50% da reserva reguladora (baseado em estudo de disponibilidade hídrica subterrânea e monitoramento mínimo de um ano hidrológico). Para aquífero confinado, a área será definida pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), considerando especificidades técnicas pertinentes, detalhadas na DN 05/2017 (MINAS GERAIS, 2017).

Devido a vários indícios de superexploração no estado de Minas Gerais, com base nas diretrizes estabelecidas pela DN 05/2017, este artigo tem como objetivo o levantamento preliminar das Áreas de Restrição e Controle em Avaliação, devido à superexploração, que correspondam às bacias em que o volume total de água explorado seja por, no mínimo, quatro meses consecutivos superior ao volume explorável estimado, conforme os critérios estabelecidos na DN 05/2017. Essas bacias foram codificadas numericamente segundo o método de Otto Pfafstetter (Pfafstetter, 1989), gerando as chamadas “ottobacias”, áreas de contribuição direta de cada trecho da rede hidrográfica.

Nessas áreas, futuramente, o IGAM pretende estabelecer programas específicos de monitoramento de parâmetros hidrogeológicos que deverão ser executados pelos próprios usuários de recursos hídricos, considerando a influência de suas respectivas intervenções.

2. ÁREA DE ESTUDO

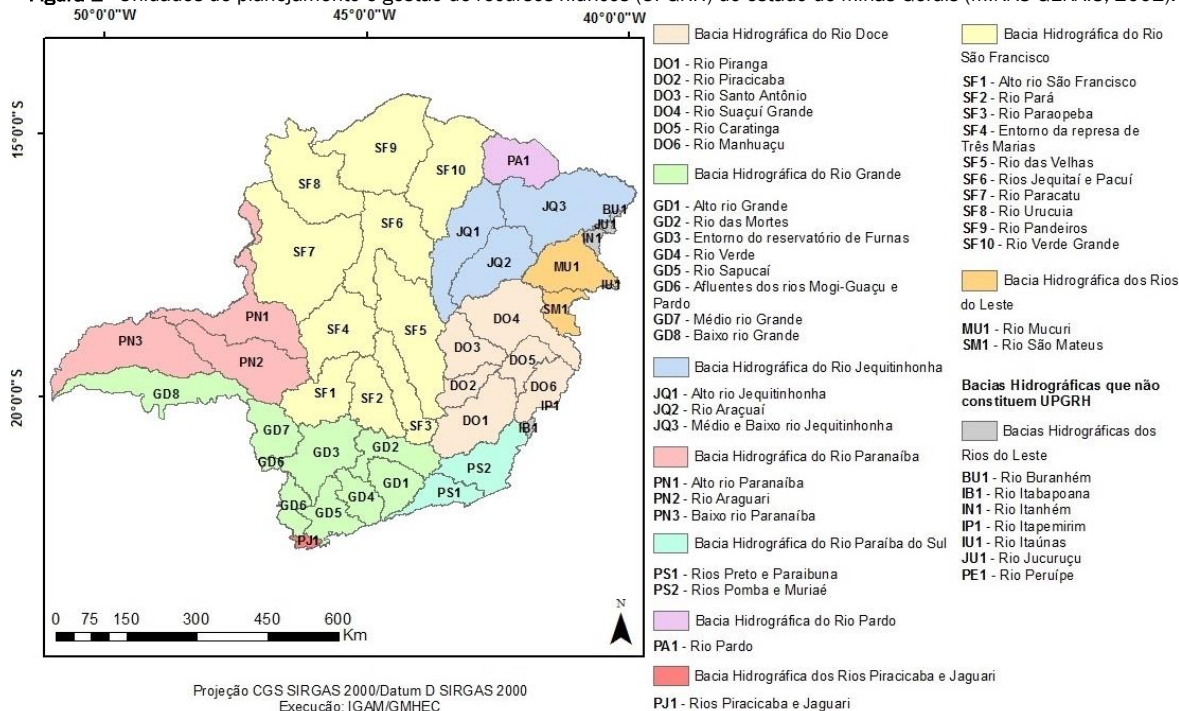
O estado de Minas Gerais apresenta uma área de 586.528 km² e é subdividido em 9 bacias hidrográficas que totalizam 36 Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRHs), correspondentes à referência espacial para a aplicação da política estadual de recursos hídricos, e

suas respectivas populações, além de outras 7 bacias hidrográficas que não constituem UPGRHs (Tabela 1 e Figura 1) (MINAS GERAIS, 2002).

Tabela 1 - Unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos e bacias hidrográficas (UPGRH) de Minas Gerais e a respectiva população total de habitantes (MINAS GERAIS, 2002)

Sigla	Nome da UPGRH	Código	Nível Otto ANA	População
Bacia Hidrográfica do Rio Doce				
D01	Rio Piranga	7601	Nível 2	700.613
D02	Rio Piracicaba	7602	Nível 2	759.835
D03	Rio Santo Antônio	7603	Nível 2	189.724
D04	Rio Suaçuí Grande	7604	Nível 2	609.440
D05	Rio Caratinga	7605	Nível 2	302.138
D06	Rio Manhuaçu	7606	Nível 2	303.984
Bacia Hidrográfica do Rio Grande				
GD1	Alto rio Grande	8481	Nível 3	101.761
GD2	Rio das Mortes	8482	Nível 3	556.695
GD3	Entorno do reservatório de Furnas	8483	Nível 3	685.303
GD4	Rio Verde	8484	Nível 3	459.936
GD5	Rio Sapucaí	8485	Nível 3	585.744
GD6	Afluentes dos rios Mogi-Guaçu e Pardo	8486	Nível 3	461.333
GD7	Médio rio Grande	8487	Nível 3	313.193
GD8	Baixo rio Grande	8488	Nível 3	538.124
Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha				
JQ1	Alto rio Jequitinhonha	7581	Nível 3	103.960
JQ2	Rio Araçuaí	7582	Nível 3	301.521
JQ3	Médio e Baixo rio Jequitinhonha	7583	Nível 3	407.363
Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul				
PS1	Rios Preto e Paraibuna	7721	Nível 3	624.939
PS2	Rios Pomba e Muriaé	7722	Nível 3	826.146
Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco				
SF1	Alto rio São Francisco	7401	Nível 2	240.504
SF2	Rio Pará	7402	Nível 2	754.145
SF3	Rio Paraopeba	7403	Nível 2	1.136.137
SF4	Entorno da represa de Três Marias	7404	Nível 2	171.763
SF5	Rio das Velhas	7405	Nível 2	2.194.393
SF6	Rios Jequitaí e Pacuí	7406	Nível 2	273.517
SF7	Rio Paracatu	7407	Nível 2	281.803
SF8	Rio Urucuia	7408	Nível 2	89.575
SF9	Rio Pandeiros	7409	Nível 2	272.592
SF10	Rio Verde Grande	7410	Nível 2	731.754
Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba				
PN1	Alto rio Paranaíba	8491	Nível 3	464.859
PN2	Rio Araguari	8492	Nível 3	883.739
PN3	Baixo rio Paranaíba	8493	Nível 3	227.852
Bacia Hidrográfica do Rio Pardo				
PA1	Rio Pardo	7578	Nível 4	117.604
Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba e Jaguari				
PJ1	Rios Piracicaba e Jaguari	8461	Nível 3	64.107
Bacia Hidrográfica dos Rios do Leste				
MU1	Rio Mucuri	7596	Nível 4	294.956
SM1	Rio São Mateus	7594	Nível 4	101.310
Bacias Hidrográficas que não constituem UPGRH				
Bacias hidrográficas dos Rios do Leste				
BU1	Rio Buranhém	7591	Nível 4	11.775
IB1	Rio Itabapoana	7718	Nível 4	38.330
IN1	Rio Itanhém	7594	Nível 4	20.234
IP1	Rio Itapemirim	7716	Nível 4	0
IU1	Rio Itaúnas	7597	Nível 4	0
JU1	Rio Jucuruçu	7592	Nível 4	6.931
PE1	Rio Peruípe	7795	Nível 4	8.412

Figura 1 - Unidades de planejamento e gestão de recursos hídricos (UPGRH) do estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2002).

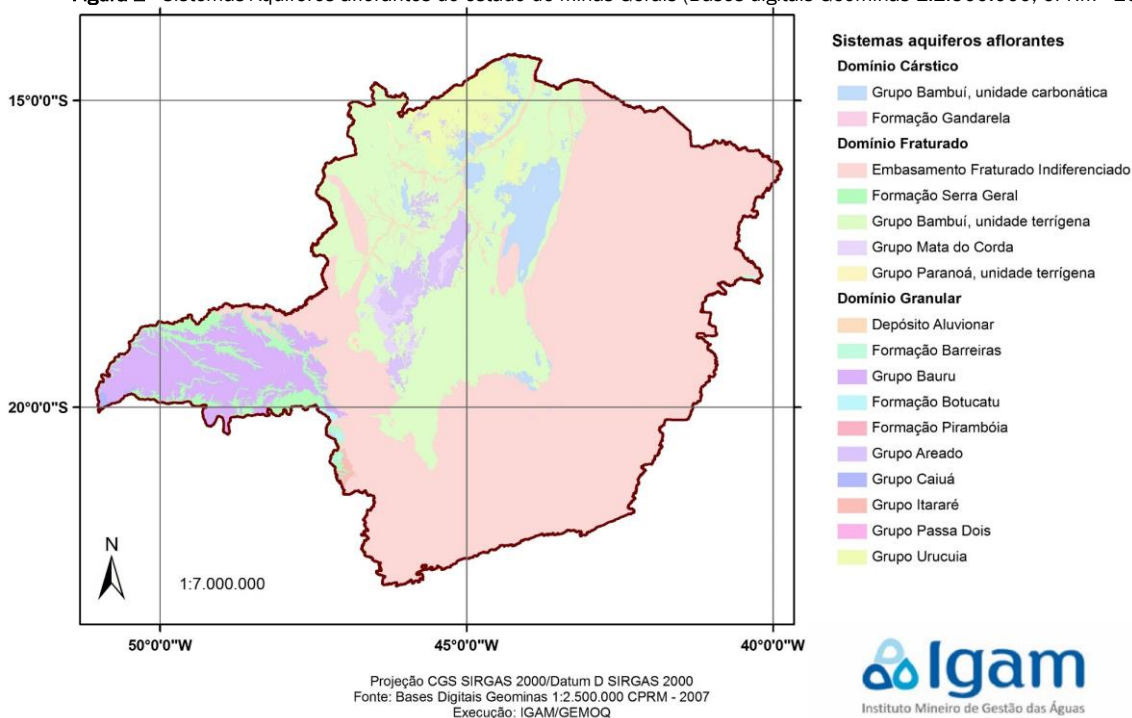


Os diferentes domínios hidrogeológicos são identificados como fraturados, sedimentares e cársticos. Conforme o Mapa de Sistemas Aquíferos do Brasil, escala 1:1.000.000 (CPRM, 2014), os principais sistemas aquíferos no estado são: depósito aluvionar, embasamento fraturado indiferenciado, as formações Barreiras, Botucatu, Gandarela, Pirambóia e Serra Geral e os grupos Areado, Bambuí, Bauru, Caiuá, Itararé, Mata da Corda, Paranoá, Passa Dois e Urucuia (Figura 2).

Um problema com os dados de outorga é que existem muitos poços sem nenhum tipo de cadastro, impedindo que a análise

seja totalmente representativa da situação real de exploração de água subterrânea. O uso da água subterrânea, de acordo com dados de outorgas e cadastros de uso insignificante, são: consumo humano (53%), usos múltiplos (19%), irrigação (13%), uso industrial (6%), rebaixamento-mineração (6%) e dessedentação animal (2%). Quanto às vazões outorgadas, os que demandam maior volume são para abastecimento público, industrial e irrigação, respectivamente. Os valores outorgados para rebaixamento de nível d'água em mineração vem logo em seguida, com menor pedido de outorgas, porém, com altos volumes (IGAM, 2016).

Figura 2 - Sistemas Aquíferos aflorantes do estado de Minas Gerais (Bases digitais Geominas 1:2.500.000, CPRM - 2007)



3. METODOLOGIA

As definições das Áreas de Restrição e Controle em Avaliação (ARCA) devem obedecer a uma série de diretrizes definidas na DN 05 de 14/09/2017. Para esse estudo foram utilizados 2 softwares: *Excel*, para a manipulação de planilhas e dados; *ArcGis 9.3* e suas extensões *ArcMap* e *ArcCatalog*, para cálculo de áreas e valores citados e definidos na DN 05/2017. Os fatores considerados para a classificação foram:

Área da bacia (A): limites das áreas de drenagem classificadas pelo método Otto Pfafstetter, um método hierárquico de codificação de bacias hidrográficas (Pfafstetter, 1989), como ottobacias de nível 6 para aquelas com até 800 km². Aquelas ottobacias de nível 6 que excederam 800 km² de área foram subdivididas até o nível 8. O sistema de base Ottocodificado digital de MG representa a distribuição da rede hidrográfica no estado, em escalas 1:50.000 e 1:100.000. Esse método de codificação utiliza até dez algarismos para criar um código exclusivo para cada bacia, baseando-se em critérios naturais, como topografia da área drenada e topologia (conectividade e direção) da rede de drenagem. Essa codificação permite saber qual o rio principal e as bacias à montante ou à jusante. Para o cálculo da área e seleção das ottobacias utilizou-se as ferramentas *calculate geometry* e *select by attributes*, do *ArcMap*.

Volume total explotado (V_{Texp}): somatório do volume mensal explotado por captações de água subterrânea na área da ottobacia considerada. Foram consideradas as outorgas de águas subterrâneas vigentes registradas em Minas Gerais, retiradas do Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CENARH 40), e os cadastros de uso insignificante. Os cadastros de uso insignificante correspondem às captações subterrâneas que apresentam um volume captado menor ou igual a 10 m³/dia, (MINAS GERAIS, 2004), ou volume menor ou igual a 14 m³/dia, por propriedade ou unidade familiar, nas UPGRH SF6, SF7, SF8, SF9, SF10, JQ1, JQ2, JQ3, PA1, MU1 (Tabela 1), e nas bacias dos Rios do Jucuruçu e Itanhém (MINAS GERAIS, 2010). A informação do volume explotado por cada poço foi organizado no *Excel*, considerando os seguintes dados: vazão outorgada, tempo previsto de funcionamento da bomba (horas/dia) e previsão de dias de funcionamento da bomba (dias/mês). Todos os poços selecionados para o estudo apresentavam algum valor de vazão outorgado. Para aqueles poços que não apresentavam registros para uma ou ambas as previsões de funcionamento foram adotados os valores de 8 horas para o tempo previsto de funcionamento da bomba (horas/dia) e 31 dias para a previsão de dias para seu funcionamento (dia/mês). Esses dados foram trabalhados no *ArcGis 9.3* de forma que o volume total explotado em cada ottobacia fosse obtido a partir do somatório dos volumes explotados pelos poços localizados na área da ottobacia, utilizando a ferramenta *Join*.

Precipitação (P): valor médio da precipitação obtido a partir das normais climatológicas, definidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na área mais próxima àquela considerada. Os valores foram definidos utilizando isoietas médias de cada mês (período de 1977 a 2006). A cada ottobacia, foi designado o valor de precipitação mensal correspondente ao valor mínimo das isoietas localizadas em sua área.

Recarga estimada (Rest): 20% do volume de precipitação mensal média (P) na área da bacia hidrográfica considerada, conforme estabelecido pela DN 05/2017;

Volume explotável estimado (VEest): 50% da recarga (Rest) calculada na área da bacia hidrográfica considerada, conforme DN 05/2017, calculado por meio do software *ArcGis*. A Figura 3 representa estes parâmetros utilizados na Deliberação Conjunta para definição de volume explotável estimado. Os valores estimados de Rest e de VEest foram todos baseados em estudos de caso, visando atingir um valor representativo para todo o estado. Uma das formas utilizadas para a estimativa de recarga foi o método proposto por Szilagyi et al. (2003), que aplica o balanço hídrico em uma bacia hidrográfica considerando a equação: $P = ET + qs + qb + N + \Delta S$

Onde P é a precipitação; ET é a evapotranspiração; qs é o escoamento superficial; qb é o fluxo de base, N corresponde a qualquer entrada ou saída de água, além da precipitação e da evapotranspiração, ΔS é a variação na reserva de água. Em um dos estudos analisados, em que essa metodologia foi aplicada para uma região de ocorrência do Sistema Aquífero Serra Geral, foram encontrados valores médios mensais de 25% e de 18% da recarga média anual (Bortolin, et al., 2016).

A área considerada é classificada como “Área de Restrição e Controle em Avaliação” caso o volume explotado seja maior do que o volume total explotável, durante, pelo menos, quatro meses consecutivos, conforme DN 05/2017, sendo:

$V_{Texp} = \Sigma (\text{vazão captada} \times \text{tempo de bombeamento} \times n^\circ \text{ dias do mês})$

$Rest = P \times A \times 0,2$

$VEest = Rest \times 0,5$

$V_{Texp} > VEest$ (4 meses consecutivos): Área de Restrição e Controle em Avaliação (ARCA)

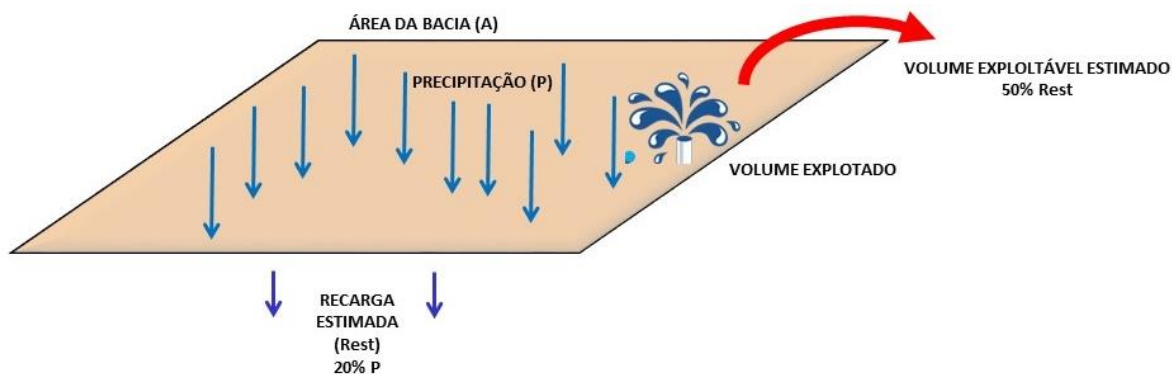
A ferramenta *Select by Attributes* do *ArcGis* foi utilizada para selecionar e separar as ottobacias referentes a cada mês que apresentavam um volume total explotado superior ao volume explotável estimado.

Para a definição das ottobacias que se enquadravam em ARCA por superexplotação foi verificada a reincidência das áreas por 4 meses seguidos, a partir da ferramenta *selection by location*. Os resultados destas etapas correspondem a outros 12 arquivos correspondentes a uma sequência de 4 meses (e.g. janeiro a abril, fevereiro a maio etc.) que são, posteriormente, unidos em um só arquivo pela ferramenta *merge*.

Uma análise dos dados dos cadastros de uso insignificante no estado foi também realizada separadamente, com o intuito de compreender o impacto desse grupo na superexplotação.

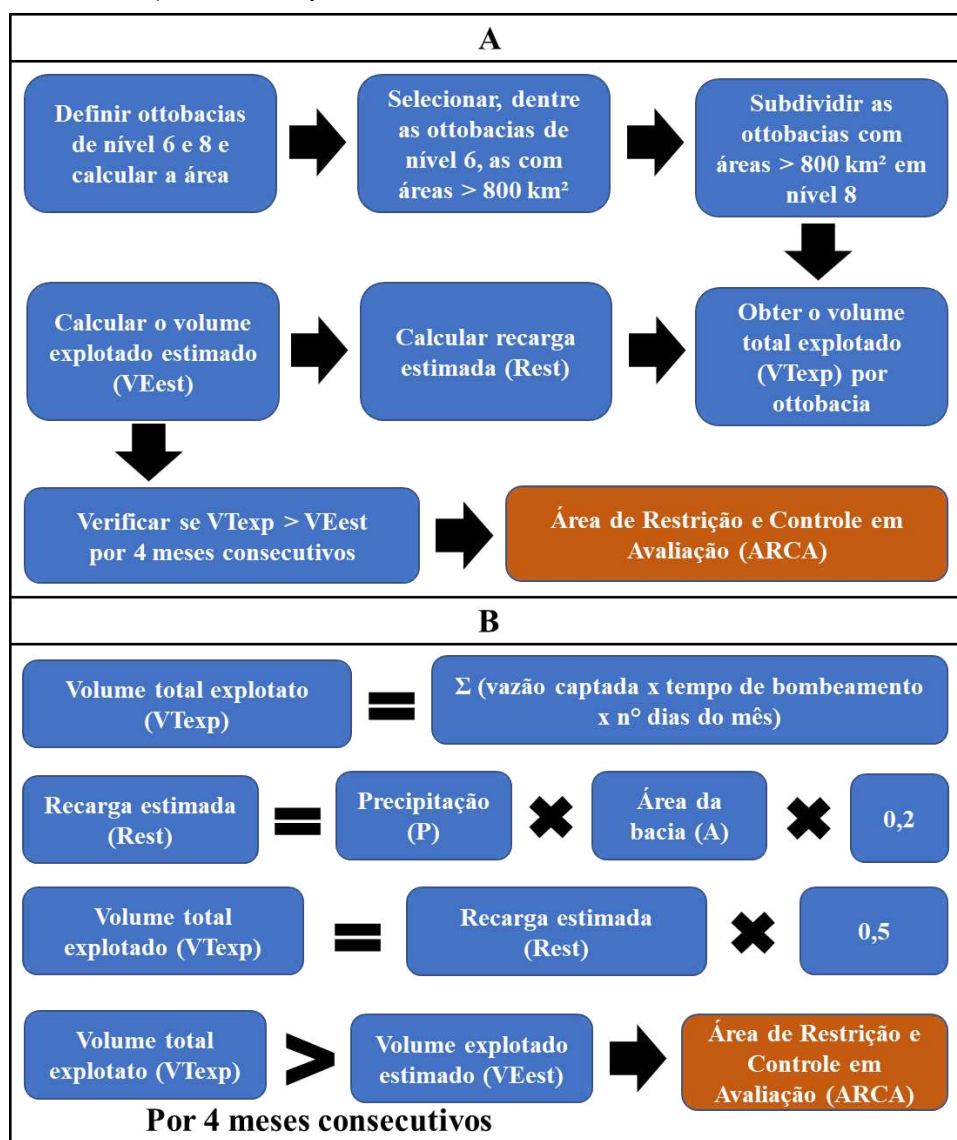
Após o levantamento das ARCAs foi realizado a caracterização dos principais modos de usos relacionados às outorgas vigentes e cadastros de uso insignificante nestas áreas, de modo a compreender aqueles com maiores participações em termos de poços totais e de vazão mensal total explotada. A Figura 4 apresenta o fluxograma das etapas de seleção das ARCAs, bem como as expressões matemáticas utilizadas no processo de seleção.

Figura 3 - Representação dos parâmetros utilizados na Deliberação Conjunta para definição de volume explotável estimado



Fonte: Autor

Figura 4 - (A) fluxograma das etapas de seleção das Áreas de Restrição e Controle em Avaliação - ARCA. (B) Expressões matemáticas utilizadas no processo de seleção



Fonte: Autor

4. RESULTADOS

4.1. Áreas de Restrição e Controle em Avaliação por Superexploração

Considerando o primeiro critério necessário para que uma bacia se enquadre nas diretrizes definidas na DN 05/2017, que corresponde à sua área, foram selecionadas 9.041 ottobacias de nível 6, divididas pelo método Otto Pfaffstetter, apresentando áreas menores que 800 km². As bacias que excederam essa área foram, então, subdivididas até o nível 8, totalizaram 6.311 ottobacias. Assim, foram analisadas ao todo, no estado de Minas Gerais, 15.352 ottobacias.

Foram, também, selecionados 64.185 poços de captação de água subterrânea no estado, considerando as outorgas vigentes e os cadastros de uso insignificante.

Dentre as 15.352 ottobacias analisadas, 215 se enquadraram nas diretrizes definidas pela deliberação normativa em

questão como ARCA por superexploração (Figura 5). Na Figura 6, destacam-se as bacias hidrográficas federativas com áreas que se enquadraram como ARCA.

Considerando a área total do estado, equivalente a 586.528 km², 6.845 km² correspondem a Áreas de Restrição e Controle em Avaliação por superexploração, conforme DN 05/2017. As áreas identificadas ocorrem em 27 das 36 UGRHs do estado (Tabela 2).

O mapa na Figura 7 traz uma compilação dos dados descritos acima e o equivalente, em porcentagem, das áreas das UGRHs correspondentes a Áreas de Restrição e Controle em Avaliação por superexploração, considerando os domínios hidrogeológicos em que ocorrem. Os domínios hidrogeológicos com mais ocorrências de ARCA estão no Grupo Bambui, com a unidade terrígena tendo maior área afetada que a carbonática, seguido do Embasamento Indiferenciado e do Grupo Areado.

Figura 5 - Ottobacias enquadradas como Áreas de Restrição e Controle em Avaliação por superexploração

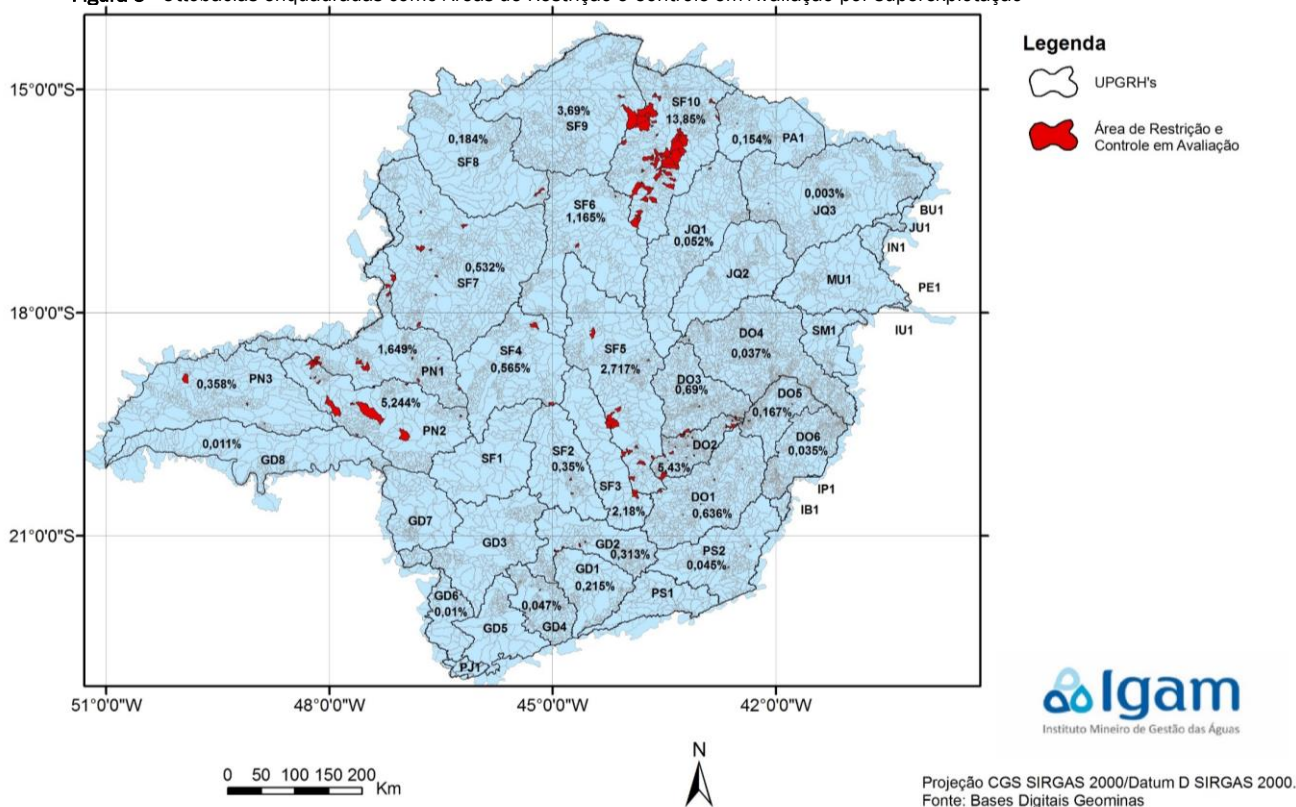


Figura 6 - Áreas de Restrição e Controle em Avaliação com foco em cada bacia hidrográfica onde houve ocorrências de superexploração
OTTOBACIAS SELECIONADAS SEPARADAS POR BACIA HIDROGRÁFICA

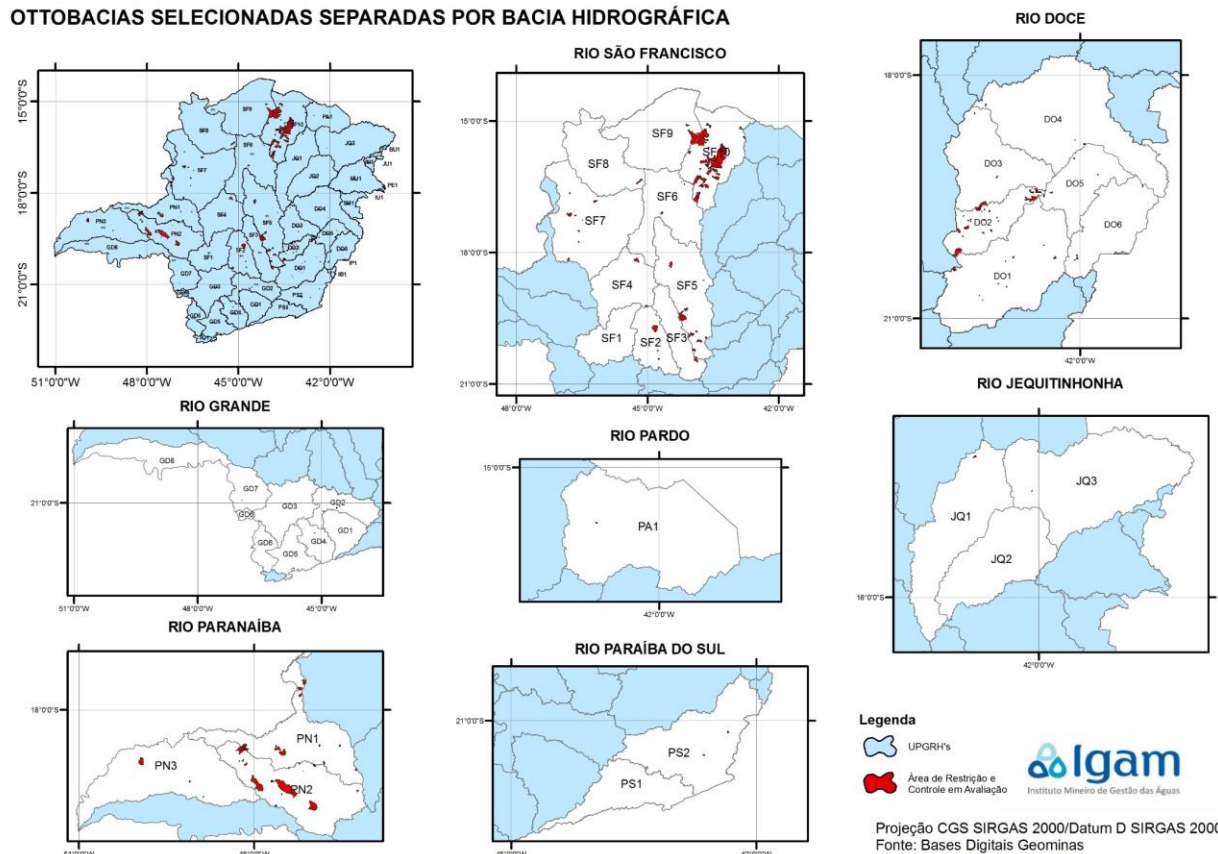


Figura 7 - Áreas de Controle e Restrição em Avaliação por superexploração e Domínios Hidrogeológicos

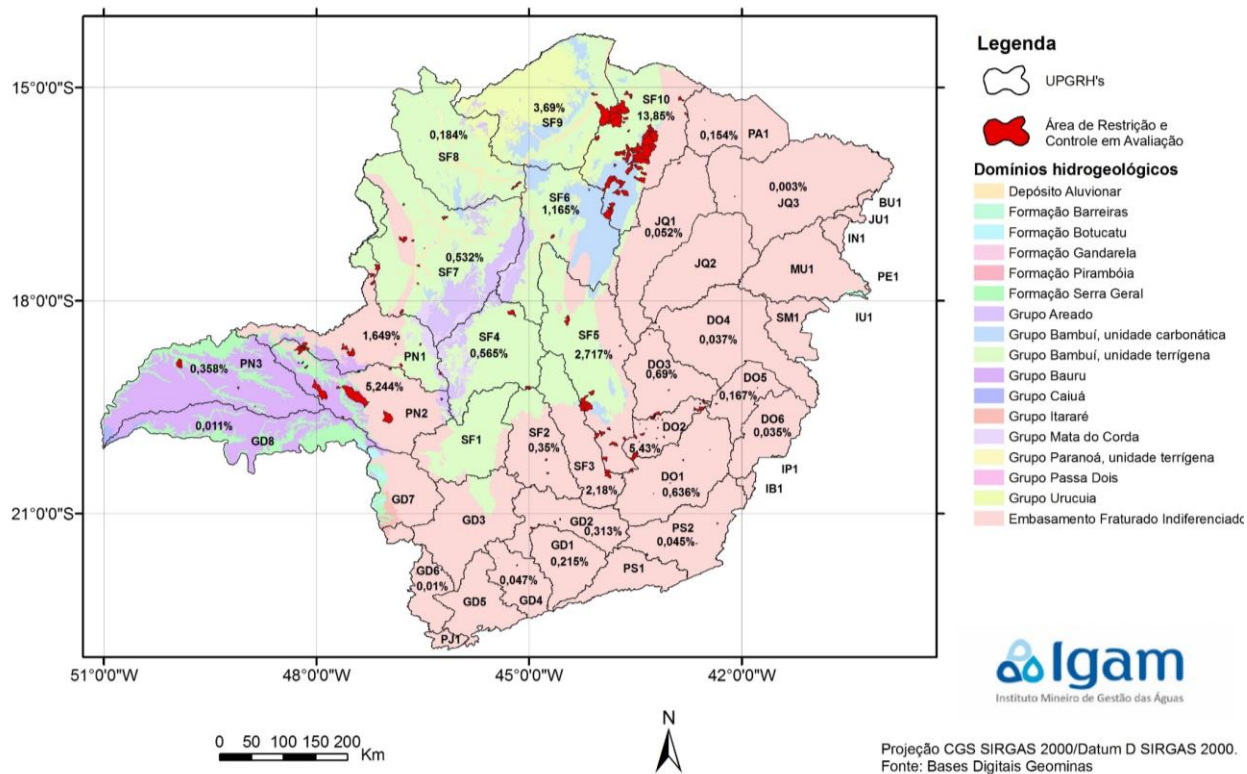


Tabela 2 - Ocorrências de Áreas de Controle e Restrição em Avaliação por UPGRH

UPGRH	Nome	Bacia Federal	Local de Referência	Ocorrências
DO1	Rio Piranga	Rio Doce	Ponte Nova	10
DO2	Rio Piracicaba	Rio Doce	João Monlevade	43
DO3	Rio Santo Antônio	Rio Doce	Itabira	4
DO4	Rio Suaçuí Grande	Rio Doce	Governador Valadares	6
DO5	Rio Caratinga	Rio Doce	Caratinga	7
DO6	Rio Manhuaçu	Rio Doce	Manhuaçu	7
GD1	Alto Rio Grande	Rio Grande	Nazareno	2
GD2	Rio das Mortes	Rio Grande	São João Del Rei	3
GD4	Rio Verde	Rio Grande	Três Corações	3
GD6	Afluentes rios Mogi-Guaçu e Pardo	Rio Grande	Poços de Caldas	1
GD7	Médio rio Grande	Rio Grande	São Sebastião do Paraíso	1
GD8	Baixo rio Grande	Rio Grande	Frutal	1
JQ1	Alto rio Jequitinhonha	Rio Jequitinhonha		1
JQ3	Médio e Baixo rio Jequitinhonha	Rio Jequitinhonha	Almenara	1
PA1	Rio Pardo	Rio Pardo	Águas Vermelhas	1
PN1	Alto rio Paranaíba	Rio Paranaíba	Monte Carmelo	18
PN2	Rio Araguari	Rio Paranaíba	Araguari	19
PN3	Baixo rio Paranaíba	Rio Paranaíba	Uberlândia	3
PS2	Rios Pomba e Muiriaé	Rio Paranaíba do Sul	Cataguases	2
SF10	Rio Verde Grande	Rio São Francisco		49
SF2	Rio Pará	Rio São Francisco	Divinópolis	3
SF3	Rio Paraopeba	Rio São Francisco	Betim	1
SF4	Entorno da represa Três Marias	Rio São Francisco	Três Marias	2
SF5	Rio das Velhas	Rio São Francisco	Belo Horizonte	13
SF6	Rios Jequitai e Pacuí	Rio São Francisco	Bocaiuva	3
SF7	Rio Paracatu	Rio São Francisco	Paracatu	10
SF8	Rio Urucuia	Rio São Francisco	Unaí	1

Com o objetivo de compreender o impacto dos dados de Cadastros de Uso Insignificante na condição de exploração da água subterrânea no estado foi realizada, separadamente, uma análise desse grupo de captações na condição de superexploração em Avaliação. Disto, resultou em 64 Áreas de Restrição e Controle em Avaliação, dentre as 15.352 ottobacias,

o que corresponde a uma área total de 1.203,76 km². A Figura 8 apresenta as Áreas de Restrição e Controle em Avaliação selecionadas utilizando apenas os cadastros de uso insignificantes, enquanto a Tabela 3 apresenta o número desta condição de ocorrências por UPGRH.

Figura 8 - Áreas de Controle e Restrição em Avaliação por superexploração considerando apenas os usos insignificantes

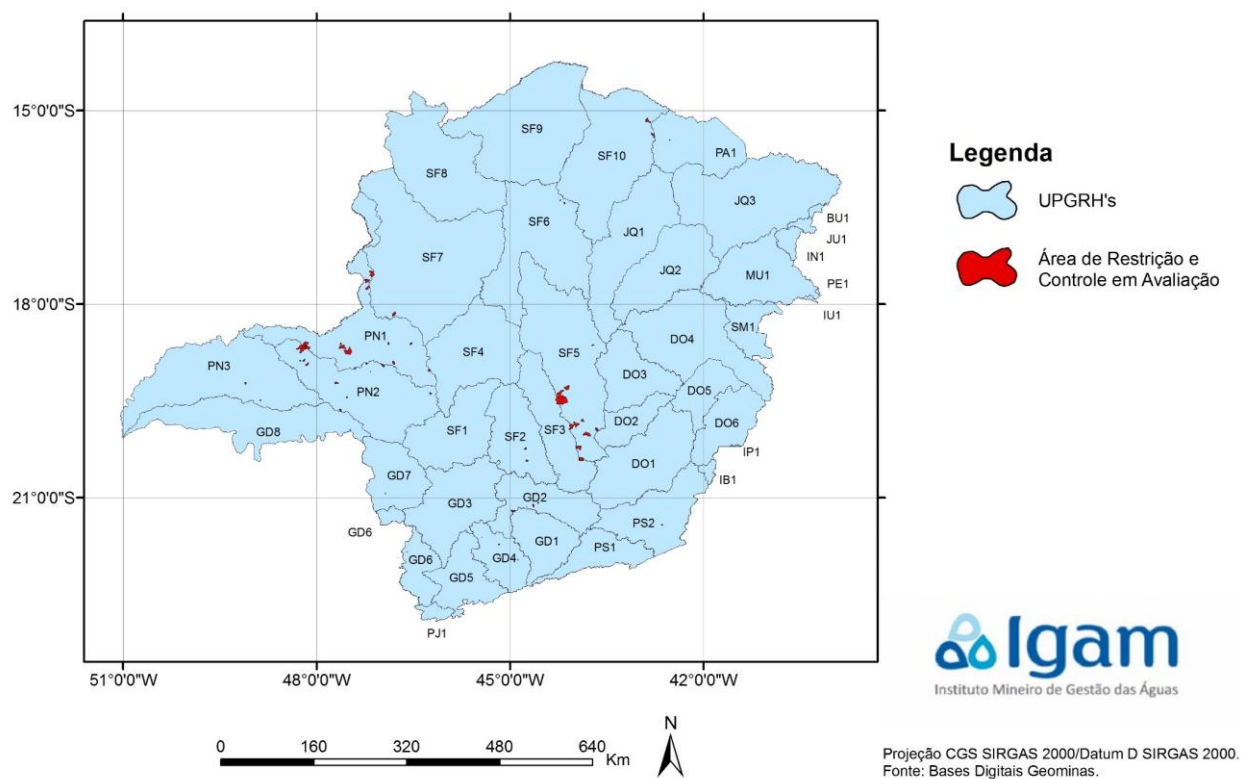


Tabela 3 - Ocorrências de Áreas de Controle e Restrição em Avaliação considerando apenas os usos insignificantes

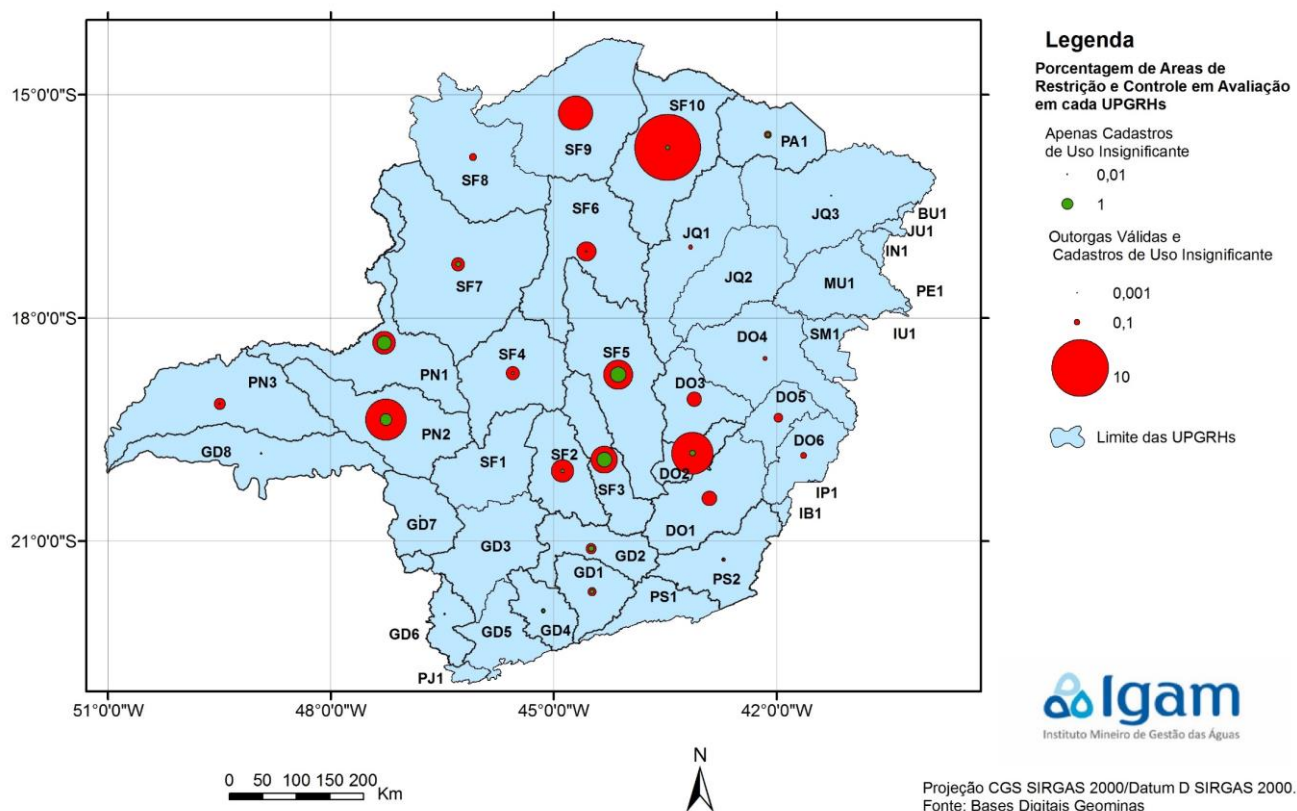
UPGRH	Nome	Bacia Federal	Local de Referência	Ocorrências
GD1	Alto Rio Grande	Rio Grande	Nazareno	1
GD2	Rio das Mortes	Rio Grande	São João Del Rei	3
GD4	Rio Verde	Rio Grande	Três Corações	3
GD6	Afluentes rios Mogi-Guaçu e Pardo	Rio Grande	Poços de Caldas	1
GD7	Médio rio Grande	Rio Grande	São Sebastião do Paraíso	1
GD8	Baixo rio Grande	Rio Grande	Frutal	1
PA1	Rio Pardo	Rio Pardo	Águas Vermelhas	1
PN1	Alto rio Paranaíba	Rio Paranaíba	Monte Carmelo	17
PN2	Rio Araguari	Rio Paranaíba	Araguari	16
PN3	Baixo rio Paranaíba	Rio Paranaíba	Uberlândia	2
PS2	Rios Pomba e Muriaé	Rio Paraíba do Sul	Cataguases	1
SF2	Rio Pará	Rio São Francisco	Divinópolis	2
SF5	Rio das Velhas	Rio São Francisco	Belo Horizonte	12
SF6	Rios Jequitaí e Pacuí	Rio São Francisco	Bocaiuva	2
SF7	Rio Paracatu	Rio São Francisco	Paracatu	1
SF10	Rio Verde Grande	Rio São Francisco		2

São identificadas 64 ottobacias cujo volume explotado por captações regularizadas, via Cadastro de Uso Insignificante, supera o volume explotável. Dentre essas, apenas 7 não aparecem no cenário de exploração no qual se considera apenas as outorgas de águas subterrâneas vigentes registradas no Estado. As UPGRHs, onde essa condição é mais significativa, são: PN1, PN2 e SF5 (Tabela 3). Dentre essas, apenas na PN2 são identificadas 4 ottobacias fora do cenário no qual se con-

sidera as captações regularizadas por meio de outorga.

A comparação entre os dois cenários descritos acima é feita por meio do mapa apresentado na Figura 9, onde a porcentagem das áreas selecionadas por UPGRH é apresentada por círculos com áreas proporcionais a esses valores. Destacam-se SF5, SF3, PN1, PN2 GD1 e GD2 com valores próximos entre as porcentagens de áreas selecionadas.

Figura 9 - O mapa apresenta uma comparação entre a porcentagem de área das UPGRHs selecionadas pela DN 05/2017



4.2. Caracterização do Uso da Água Subterrânea nas Áreas de Restrição e Controle em Avaliação por Superexploração

Os usos associados às captações de água subterrânea nas Áreas de Controle e Restrição em Avaliação incluem o abastecimento público e consumo humano, irrigação, consumo industrial, dessedentação animal, lavagem de veículos, mineração e pesquisa hidrogeológica. Outros modos, como comercialização de caminhões pipa, paisagismo e recreação, são englobados na categoria "outros".

O abastecimento público e uso industrial destacam-se entre os usos com maiores captações totais mensais, correspondendo a 36,5% e 35,5%, respectivamente, da vazão total explotada nas Áreas de Controle e Restrição em Avaliação, o que equivale a cerca de 30 milhões de metros cúbicos mensais cada. Estes modos de uso são seguidos pela irrigação, dessedentação animal, rebaixamento de nível d'água, e finalidades, que totalizam os 28% restantes.

A comparação entre os valores do número de outorgas válidas e o somatório da vazão explotada por uso aponta que o consumo industrial, embora corresponda a uma menor quantidade de outorgas válidas, representa uma parcela importante (35,5%) da vazão total. A análise para os cadastros de uso insignificante realizada separadamente indicou que a porcentagem de cadastros e a vazão mensal total explotada, por uso, apresentam um mesmo comportamento geral nas Áreas de Controle e Restrição em Avaliação identificadas. De forma que os usos múltiplos correspondem à principal finalidade, tanto em número de outorgas, como no volume explotado mensalmente, seguido do abastecimento público e consumo humano, dessedentação animal, irrigação, lavagem de veículos, consumo industrial e outros

5. DISCUSSÃO

Como apresentado, a publicação da DN 05/2017 trouxe um novo olhar à gestão do recurso hídrico subterrâneo em Minas Gerais. A partir dos critérios nela estabelecidos, ações de ges-

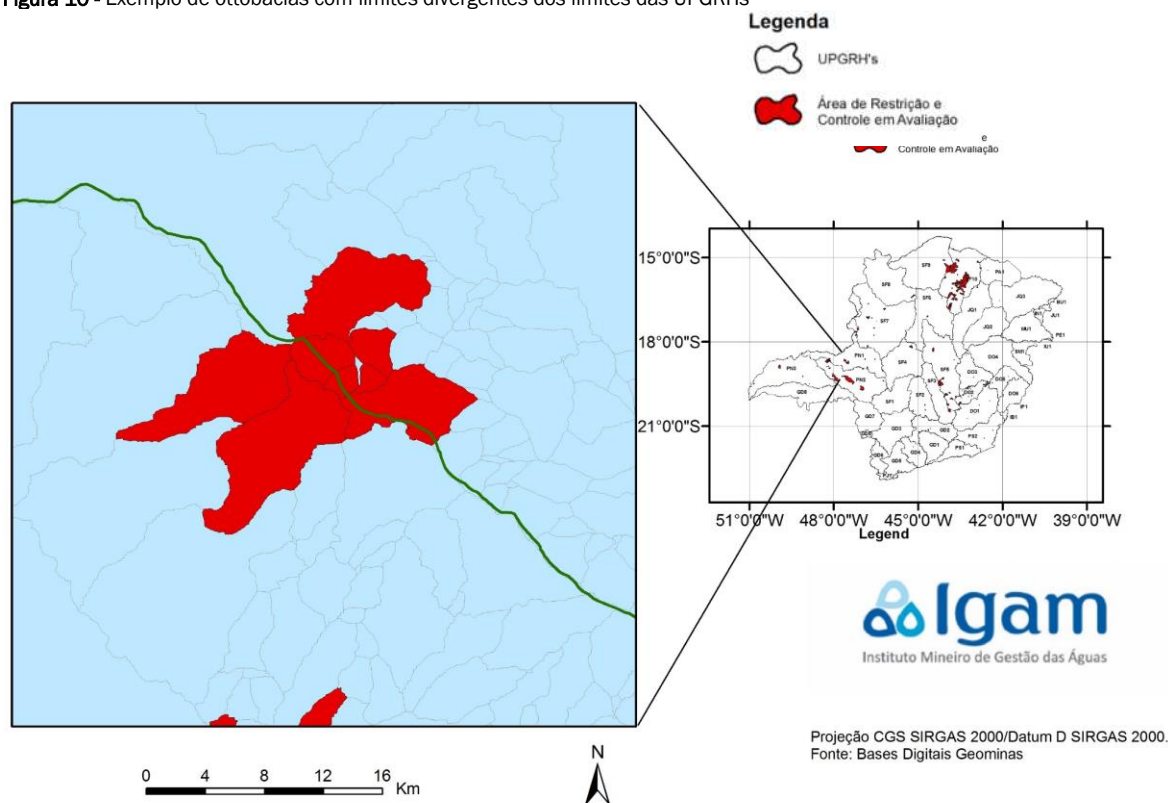
tão com vistas ao controle mais efetivo do uso estão sendo feitos, considerando a sustentabilidade desse recurso.

Para a aplicação do critério proposto na DN 05/2017 para a identificação dos locais que podem representar “Áreas de Restrição e Controle em Avaliação” optou-se por se utilizar os dados de outorga atualizados pelo IGAM no CNARH 40 da Agência Nacional de Águas (ANA), uma vez que estes passaram por uma consistência prévia do órgão gestor estadual antes de compor a plataforma de dados nacional. Desse cadastro, constam todas as outorgas emitidas pelo estado, sendo que neste estudo foram consideradas aquelas vigentes no estado até o ano de 2018. Sendo assim, não foram consideradas nesse levantamento outorgas vencidas ou processos formalizados que ainda não possuem Portaria de Outorga de Uso de Recurso Hídrico emitida. Nesses casos, os poços estão em operação, mas aguardam a portaria para a regularização, sendo que esses valores de exploração existentes deixaram

de ser considerados, o que, de certa forma, leva a subestimar o número encontrado de 215 ottobacias com problemas de superexploração no estado.

Outro aspecto na aplicação do critério corresponde à identificação e contagem das ottobacias nas diferentes UPGRHs. É observada uma divergência nos limites das subdivisões definidas pelo método Otto Pfaffstetter e as subdivisões das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos de Minas Gerais. Via de regra, as diferenças são pequenas, divergindo especialmente por fator de escala de análise, porém existem casos em que os limites de UPGRH e de ottobacias constituintes são realmente diferentes. É o caso das UPGRHs PN1 e PN2 que dividem 3 ottobacias nível 8. Esse fato não atrapalha a análise dos dados, uma vez que sua ocorrência é pontual e, quando identificadas, foram analisadas separadamente. A Figura 10 exemplifica a situação descrita.

Figura 10 - Exemplo de ottobacias com limites divergentes dos limites das UPGRHs



Ao se considerar apenas os usos outorgados, verifica-se que dentre as UPGRHs que foram identificadas como Áreas de Restrição e Controle em Avaliação destacam-se pelo elevado número de ocorrências as seguintes áreas: SF10 - Rio Verde Grande: com 49 ocorrências; DO2 - Rio Piracicaba: com 43 ocorrências; PN1 - Alto Rio Paranaíba: com 18 ocorrências; PN2 - Rio Araguari: com 15 ocorrências; SF5 - Rio das Velhas: com 13 ocorrências; e SF7 - Rio Paracatu: com 10 ocorrências. Observando-se apenas os Cadastros de Uso insignificante as UPGRHs, nas quais se identificam Áreas de Restrição e Controle em Avaliação, em quantidade mais significativa (acima de 10) são: PN1, PN2 e SF5.

Os resultados obtidos retratam algumas situações já percebidas pelo órgão gestor ao longo da evolução observada para o uso da água subterrânea no estado, podendo destacar a bacia do rio Verde Grande, onde o conflito de uso entre água subterrânea e superficial deve ser investigado e área de influência da superexploração mais bem caracterizada. Nas bacias dos rios Piracicaba, das Velhas e do Paracatu, e, recentemente, dos rios Doce e Grande, por conta dos rompimentos das barragens na Samarco, em Mariana (2016), e na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019), as áreas de superexploração estão, muitas vezes, relacionadas à mineração, que tem o controle do nível de água subterrânea, as atividades de ex-

plotação e a delimitação de sua área de influência sob monitoramento advindo da outorga dessa atividade de rebaixamento.

A superexploração da água subterrânea traz uma série de consequências, nas mais diversas escalas espaciais e temporais, devido à complexidade de funcionamento dos sistemas aquíferos e sua interação com o meio físico. Grande parte destes

danos não são gerados simultaneamente, com uma relação de causa-efeito direta e simples, ocorrendo em uma escala de tempo maior e podendo passar despercebidos para os leigos (Custodio & Silva Junior, 2008). É necessário que estes danos produzidos, no curto e longo prazo, sejam superados pelos benefícios do desenvolvimento dos recursos naturais. O Quadro 1 apresenta o resumo dos danos ocasionados pela superexploração dos sistemas aquíferos.

Quadro 1 - Danos gerados devido à superexploração das águas subterrâneas

<p><u>Efeitos no volume de recurso</u></p> <p>Rebaixamento do nível freático</p> <ul style="list-style-type: none"> - Custo de extração crescente - Substituição de poços, bombas e instalações <p>Decréscimo das vazões em nascentes, nível de base dos rios e superfícies úmidas</p> <p>Maiores comprimentos onde o rio perde água</p> <p>Em casos extremos, a exaustão do próprio aquífero</p>
<p><u>Efeitos na qualidade da água</u></p> <p>Mudanças na qualidade quando o padrão de fluxo se modifica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Movimentação de corpos de água com má qualidade e plumas de poluição - Intrusão de água do mar em aquíferos costeiros - Infiltração mais fácil de águas superficiais <p>Mescla de águas de diferentes qualidades em poços e furos de sondagem</p>
<p><u>Outros efeitos</u></p> <p>Subsidência de solos</p> <p>Crescentes taxas de colapso</p> <ul style="list-style-type: none"> - Em áreas de carste - Devido a poços mal construídos

Fonte: Adaptado de Custodio & Silva Junior (2008)

Apresentados os efeitos adversos da superexploração da água subterrânea, destaca-se a importância de seu controle quando da aplicação de forma adequada de um dos princípios previstos nas políticas estadual e nacional de recursos hídricos - a gestão integrada destes recursos, tanto no aspecto de qualidade quanto de quantidade. A gestão integrada é norteada pela interdependência entre os corpos d'água superficiais e subterrâneos, visando garantir a sustentabilidade hídrica. Cada vez mais os instrumentos de regulação dos usos superficiais e subterrâneos são hoje tratados separadamente, ignorando o fato de que as vazões mínimas, que regulam as outorgas superficiais, são ajustadas pela água liberada pelos aquíferos. A gestão integrada é algo novo no Brasil e trabalhos como este podem ser guias para a escolha de regiões em que esse tipo gestão tem mais urgência em ser aplicada.

6. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia de trabalho se mostrou eficiente no que diz respeito à padronização das etapas de cálculo e geoprocessamento. A obtenção de resultados coerentes com o que se espera de áreas com maiores índices de bombeamento e de conflitos relativos à disponibilidade e uso d'água superficial e subterrânea, como o norte do estado e o triângulo mineiro, indicam a boa funcionalidade do método. Algumas questões relacionadas à diferença entre os limites das UPGRH e da divisão em otobacias causam problemas pontuais permitindo que a situação, via de regra, seja contornada com uma análise individual dos casos.

Ao comparar os resultados entre os valores totais de vazão outorgados e apenas os de uso insignificante conclui-se que, em alguns casos, como nas UPGRHs SF5, SF3, PN1 e PN2, essa captação não é tão insignificante como indica o nome, apresentando uma participação importante nas vazões totais de água subterrânea captadas no estado.

Com relação aos domínios hidrogeológicos aflorantes, onde ocorrem as Áreas de Restrição e Controle em Avaliação (ARCA), destacam-se o Grupo Bauru, que aflora na região do triângulo mineiro e tem o maior número de ARCAs nas UPGRHs PN1 (18 ARCAs) e PN2 (19 ARCAs); e o Grupo Bambuí, que ocupa toda a parte centro-oeste e norte do estado, mas tem o maior número de ocorrências ao norte, na UPGRH SF10 (49 ARCAs). No embasamento fraturado indiferenciado, mais precisamente na UPGRH DO2 (43 ARCAs), existe um elevado número de ARCAs, porém, se for considerada a relação de área, não se vislumbra um quadro tão complicado quanto os grupos Bambuí e Bauru. Como são avaliados os domínios aflorantes em mapa, é necessário um estudo mais aprofundado dos perfis de construção e litológicos dos poços outorgados, para saber quais sistemas aquíferos realmente estão sendo mais atingidos.

Quanto aos tipos de uso registrados, percebe-se, como esperado, uma maior contribuição nos valores de vazão explorados do consumo industrial, do abastecimento público e consumo humano. Toda análise aqui apresentada foi realizada a partir dos dados de cadastros oficiais e não reflete por completo a

real situação da exploração de água subterrânea no estado, uma vez que vários poços operam à margem de qualquer regularização, sem a devida outorga ou cadastro de uso insignificante. É necessário que os entes envolvidos na gestão dos recursos hídricos encontrem alternativas e caminhos para a conscientização dos usuários sobre a importância da regularização e venham trazer para legalidade a população que utiliza desse importante recurso, permitindo assim que as ações de planejamento e gestão se tornem cada vez mais eficazes.

O estudo corresponde a uma análise quantitativa e espacial das condições de exploração em Minas Gerais. Identificadas as áreas de superexploração em avaliação, caberá ao órgão gestor estabelecer a ordem de prioridade para execução dos estudos que venham ou não confirmar a superexploração, conforme previsto nos artigos 11 e 12 da Deliberação, e adotar as medidas de controle necessárias.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), em especial à Maricene Menezes de Oliveira Mattos Paixão, pelos anos de dedicação à gestão de águas no estado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

- ASSUNÇÃO P.H.S. *Análise da zona de recarga e sua interação com o aquífero cárstico na Lagoa do Matadouro, zona urbana de Sete Lagoas: uma abordagem científica e socioambiental*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. 81 p.
- BORTOLIN, T.A; REGINATO, P.A.P; SCHNEIDER, V.E. Estimativa de recarga pelo método do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica com ocorrência de aquíferos fraturados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19., 2016. *Anais [...]* Campinas-São Paulo, 2016.
- CHATTON, E.; LUDWIG, R.; AQUILINA, L.; PETELET-GIRAUD, E.; CARY, L.; BERTRAND, G.; LABASQUE, T.; HIRATA, RICARDO; MARTINS, VERIDIANA; MONTENEGRO, S. M. G. L.; VERGNAUD, V.; AUROUET, A.; KLOPPMANN, WOLFRAM; PAUWELS, HÉLÈNE. Glacial recharge, salinization and anthropogenic contamination in the coastal aquifers of Recife (Brazil). *Science Of The Total Environment*, v. 569-570, p. 1114-1125, 2016.
- CPRM, SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa de Domínios e Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil. Escala: 2.500.000. Brasília. CUSTODIO, E., SILVA JUNIOR, G.C. 2008 Conceitos básicos sobre o papel ambiental das águas subterrâneas e os efeitos da sua superexploração. *Bo Geológico y Minero*, v. 119, n. 1, p. 93-106, 2007.
- DOMENICO P. 1972. *Concepts and models in groundwater hydrology*. McGraw-Hill Book Co., p 405.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET) [on line] [2018]. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>
- GALVÃO P, HALIHAN T, HIRATA R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal*, v. 23, n. 7, p. 1499–1513, 2015.
- GALVÃO P, HIRATA R, HALIHAN T, TERADA R. Recharge sources and hydrochemical evolution of an urban karst aquifer, Sete Lagoas, MG, Brazil. *Environ Earth Sci*, v.76, p.159, 2017b.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. *Diagnóstico do abatimento de terreno em Cajamar, SP, e definição de medidas e diretrizes para a resolução do problema*. São Paulo. 1987. 7v (IPT Relatório no 25 053).
- MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa CERH - MG Nº 06, de 04 de outubro de 2002*. Estabelece as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte. Outubro, 2002.
- MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa CERH - MG nº 09, de 16 de junho de 2004*. Define os usos insignificantes para as circunscrições hidrográficas no Estado de Minas Gerais. Junho, 2004.
- MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa CERH nº 34, de 16 de agosto de 2010*. Define o uso insignificante de poços tubulares localizados nas Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos que menciona e dá outras providências. Agosto, 2010.
- MINAS GERAIS. *Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH Nº 05, de 14 de setembro de 2017*. Estabelece diretrizes e procedimentos para a definição de áreas de restrição e controle do uso das águas subterrâneas e dá outras providências. Belo Horizonte. Setembro, 2017.
- NAKAZAWA, V. A. PRANDINI, F. L., ÁVILA, I. G. DE, PONÇANO, W. L., BRAGA, A. C. DE O, BOTTURA, J. A. SANTORO, E. Cajamar – carst e urbanização: investigação e monitoramento. In: Cong. Bras. Geol. Eng., 5, São Paulo, 1987. *Anais [...]* São Paulo, ABGE. V. 2, p. 443-460, 1987.
- ORTIZ-ZAMORA, D., & ORTEGA-GUERRERO, A. Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resources Research*, v. 46, n. 1, 2010. <http://doi.org/10.1029/2008WR007398>
- PPAFSTETTER, O. *Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação*. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), 1989, p. 19. Manuscrito não publicado.
- PRANDINI, F. L., NAKAZAWA, V. A., ÁVILA, I. G. DE, OLIVEIRA, A. M. S., SANTOS, A. R. DOS. Cajamar – carst e urbanização: zoneamento de risco. In: CONG. BRAS. GEOL. ENG., 5, São Paulo, 1987. *Anais [...]* São Paulo, ABGE. V. 2, p. 461-470, 1987.
- REIS, F.A.V. *Curso de Geologia Ambiental Via Internet: curso teórico*, UNESP [on line] [2001]. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter12.html>
- SOPHOCLEOUS M. Managing water resources systems: why “safe yield” is not sustainable. *Ground Water* 35, n. 4, p. 561, 1987.
- SOPHOCLEOUS M (ed.). *Perspectives on sustainable development of water resources in Kansas*. Kansas Geological Survey Bulletin 239
- SOPHOCLEOUS M. From safe yield to sustainable development of water resources: The Kansas experience. *Journal of Hydrology*, n. 235, p. 27-43, 2000.
- SZILAGYI, J., HARVEY, F. E., AYERS, J. F., Regional estimation of base recharge to ground water using water balance and a base-flow index: *Ground Water*, v. 41, no. 4, p. 504-513, 2003.
- TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 160 p.