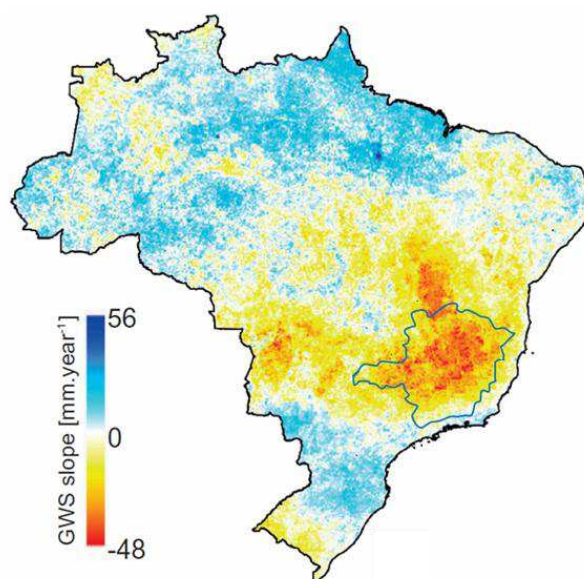


**Perdas e Ganhos Hídricos na Bacia do Rio São Francisco,
no Sinclinal Moeda (Flancos Leste e Oeste) e em
Outras Bacias de Minas Gerais: uma Síntese de Estudos Recentes**



Mapa de tendências de variação do armazenamento de água subterrânea GWS (*Groundwater storage*) em mm/ano, revelando perdas de água em todo o estado de Minas Gerais entre 2002 e 2023, além de perdas maiores no sudoeste da Bahia e no Centro-Oeste. Fonte: Getirana et. al (2026), Fig. 3.

0	PRIMEIRA EMISSÃO	15 /06/2026	ECC	-	-
Rev.	Descrição	Data	Elaborado	Verificado 1	Verificado 2
PROJETO/ÁREA		TEMA/SÍTIO	CLASSIFICAÇÃO		REV.
RECURSOS HÍDRICOS		MINAS GERAIS	RH-MG-NT-14		1
GRUPO		SETOR	DENOMINAÇÃO		FOLHA
COMITÊ TÉCNICO		ENGENHARIA	Perdas e Ganhos Hídricos na Bacia do Rio São Francisco, no Sinclinal Moeda (Flancos Leste e Oeste) e em Outras Bacias de Minas Gerais: uma Síntese de Estudos Recentes		1/52
		Fórum Permanente São Francisco – FPSF			
		Belo Horizonte			

O Fórum Permanente São Francisco (FPSF)

é uma entidade da sociedade civil, um grupo de cidadãos e cidadãos que foi formado três dias depois do rompimento da barragem do Córrego do Feijão, da empresa Vale, em Brumadinho - MG, em janeiro de 2019. Foi criado com o objetivo inicial de dedicar-se à segurança e à qualidade de vida da população que vive em áreas de mineração no Estado de Minas Gerais. Posteriormente expandiu sua área de atuação para englobar as questões mais abrangentes ligadas à sustentabilidade e ao meio ambiente. A partir de janeiro de 2023 o FPSF se tornou um Instituto.

Missão

Defesa, preservação e conservação do meio ambiente e do patrimônio histórico-cultural, bem como a promoção do desenvolvimento sustentável.

Desenvolvimento e divulgação de tecnologias alternativas voltadas para a sustentabilidade e para a regeneração. Realização de estudos e pesquisas, produção e divulgação de informações e de conhecimentos técnicos e científicos tendo como base o conceito de ecologia integral. Incentivo ao uso racional dos recursos naturais, com ênfase na segurança hídrica.

Valores

O Fórum Permanente São Francisco (FPSF), no desenvolvimento de suas atividades, tem como fundamento os princípios da legalidade, impessoalidade, moralidade, publicidade, economicidade e eficiência, sem qualquer discriminação de raça, cor, gênero, orientação sexual e religião e sem conotações político-partidárias.

Todos os direitos reservados. É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesse documento, desde que citada a fonte.



2019-2022

1	Resumo Executivo	6
2	Conclusões	7
3	Objetivo	10
4	Introdução	10
5	O Déficit Hídrico no Brasil: Contexto Nacional	13
5.1	O agravamento da crise hídrica e seu reflexo nas águas superficiais e subterrâneas.....	13
5.2	Ressecamento e aceleração do ciclo hidrológico brasileiro: efeitos combinados do clima e do uso da terra	16
6	Caracterização Hidrogeológica da Região de Interesse	19
6.1	A Bacia do Rio São Francisco	19
6.2	O Sinclinal Moeda E O Quadrilátero Aquífero-Ferrífero	20
6.3	Sistemas aquíferos do Sinclinal Moeda	20
6.4	Outros sistemas hídricos de Minas Gerais	21
7	Bases Científicas e Metodologia dos Estudos	21
7.1	Estudos de escala nacional e regional.....	21
7.2	Estudos sobre impactos da irrigação nos recursos hídricos	22
7.3	Estudos locais no Sinclinal Moeda	23
8	Perdas Hídricas Causadas pela Irrigação Agrícola em Minas Gerais	23
8.1	Dimensão da irrigação em Minas Gerais e no Brasil.....	23
8.2	Impactos da irrigação sobre as águas subterrâneas na Bacia do São Francisco.....	24
8.3	Irrigação e conflitos hídricos no Noroeste de Minas Gerais	24
8.4	Impactos da irrigação na Bacia do Rio Verde Grande.....	25
8.5	Efeitos da irrigação sobre os aquíferos do Cerrado mineiro	26
8.6	Desafios da gestão integrada	28
9	Perdas Hídricas no Sinclinal Moeda	28
9.1	Recarga dos aquíferos.....	28
9.2	Superexploração e déficit hídrico: flanco leste	29
9.3	Rebaixamento do nível d'água: flanco leste	29
9.4	Projeções futuras no flanco leste (2019–2039)	33

9.5	Superexploração e déficit hídrico: flanco oeste.....	33
9.6	Rebaixamento do nível d'água: flanco oeste	34
9.7	Impactos sobre os rios e o abastecimento urbano	34
9.8	A crise hídrica de 2014-2015.....	35
10	Perdas Hídricas em Outras Partes da Bacia do Rio São Francisco.....	36
10.1	Tendências de depleção do armazenamento subterrâneo	36
10.2	Rios perdedores na Bacia do São Francisco	36
10.3	Perdas no Aquífero Urucuia	37
10.4	Outros aquíferos afetados em Minas Gerais	37
11	Influência do El Niño e da La Niña sobre os Recursos Hídricos	38
12	Síntese Quantitativa das Perdas e Ganhos Hídricos.....	38
13	Projeções Futuras e Perspectivas	49
14	Referências Bibliográficas.....	49

Perdas e Ganhos Hídricos na Bacia do Rio São Francisco, no Sinclinal Moeda (Flancos Leste e Oeste) e em Outras Bacias de Minas Gerais: uma Síntese de Estudos Recentes

Com base em artigos científicos e teses de doutorado e mestrado, entre os quais se destacam:

CAMACHO, C. R. (2025) – Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ
MAGALHÃES, C. C. C. (2023) – Dissertação de Mestrado/UFMG
ANDRADE, I. B. (2023) - Dissertação de Mestrado/UFMG
GETIRANA (2016) - Journal of Hydrometeorology
GETIRANA et. al (2021) - Nature
GETIRANA et al. (2026) – Science Advances
UCHÔA et al. (2024) – Nature Communications
MAGALHÃES et al. (2022) – Brazilian Journal of Geology
PACHECO NETO et al. (2026) – Hydrogeology Journal
ANDRADE et al. (2025) – Rev. Brasileira de Geografia Física
ANDRADE et al. (2023) – XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos
LUCAS et al. (2021) - Water
RODRIGUES et al. (2024) - Journal of Environmental Management
GUIMARÃES e Landau (2024) - Documentos Embrapa, 1167756

Entre os diversos autores, coautores, orientadores e coorientadores (local.contributor.advisor) dos artigos e dissertações utilizados para a elaboração dessa Nota Técnica podem ser citados:

Tema: teses e artigos relacionados às perdas de água no Sinclinal Moeda

- **Celina Cenni de Castro Magalhães** - Mestre em Hidrogeologia pelo IGC-UFMG e geóloga no Instituto de Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (IMA-SC).
- **Isabella Brito Andrade** - Mestre em Hidrogeologia pelo IGC-UFMG.
- **Maria Antonieta Alcântara Mourão** – Hidrogeóloga sênior do SGB/CPRM, Belo Horizonte; Mestre em Geologia pela UNB; doutorado em Meio Ambiente pela UFMG.
- **Marília de Carvalho Melo**, ex-secretária da SEMAD - MG, ex-Diretora-Geral do IGAM, atual Presidente da COPASA; Professora da Universidade do Vale do Rio Verde (Três Corações- MG) Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG; doutorado em PEC - COPPE/UFRJ.
- **Nilson Guiguer Junior** – Professor da UFSC; PhD em Geologia pela University of Waterloo; Mestre em Hidrologia pela Escola Politécnica da USP.
- **Paulo Henrique Ferreira Galvão** – Professor do IGC da UFMG; Mestre em Geologia pela UFPE; doutorado pela USP e Boone Pickens School of Geology, Oklahoma State University; coordenador do LEHID e do CPMTc da UFMG.
- **Rodrigo Sérgio de Paula** – Professor Adjunto do Departamento de Geologia da UFMG desde 2019; Fundador e coordenador do Laboratório de Estudos Hidrogeológicos – LEHID -UFMG.

- **Wallace Maciel Pacheco Neto** – Professor da UFPE; Doutor em Geologia pela UFMG, com ênfase em Hidrogeologia Cárstica, Mestre em Geologia pela Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

Tema: teses e artigos sobre perdas de água no Brasil

- **Augusto César Vieira Getirana** – Cientista na NASA Goddard Space Flight Center e University of Maryland. Mestre em gestão de recursos hídricos pela COPPE/UFRJ; doutorado em cotutela pela COPPE/UFRJ e pelo LMTG/UPS em modelagem hidrológica e sensoriamento remoto;
- **Clyvikh Renna Camacho** – Pesquisador em Geociências no SGB/CPRM, Belo Horizonte. Mestre em Geologia com foco em Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental pela UFC; doutorado em monitoramento de águas subterrâneas pela COPPE/UFRJ.
- **Maria Antonieta Alcântara Mourão** – Hidrogeóloga sênior do SGB/CPRM, Belo Horizonte; Mestre em Geologia pela UNB; doutorado em Meio Ambiente pela UFMG.
- **Paulo Tarso Sanches de Oliveira** – Professor da UFMS e da EESC-USP; doutorado em Ciências - Engenharia Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP; pós-doutorado na EESC-USP e na Auburn University, Alabama.
- **Otto Corrêa Rotunno Filho** – Professor da UFRJ; Mestre em Engenharia Civil pela URFJ; doutorado pela University of Waterloo; atua principalmente nas áreas de sensoriamento remoto, modelagem hidráulico-hidrológica, geoestatística

1 Resumo Executivo

A Bacia do Rio São Francisco e o estado de Minas Gerais atravessam uma crise hídrica subterrânea de natureza progressiva, com múltiplas causas e em aceleração nas últimas décadas. Esta Nota Técnica sintetiza os resultados de diversos estudos científicos recentes que documentam, por diferentes métodos e escalas espaciais, as perdas de água subterrânea provocadas pela mineração, pela irrigação agrícola, pelo desmatamento do Cerrado e pela variabilidade climática, com ênfase especial no Sinclinal Moeda (Quadrilátero Aquífero-Ferífero) e nas bacias dos rios Paracatu e Verde Grande, no Norte e Noroeste de Minas Gerais.

No Sinclinal Moeda, a extração de água subterrânea para rebaixamento dos lençóis freáticos das minas de ferro no flanco leste atingiu 52 milhões de m³/ano em 2019 – equivalente a mais de 150% da reserva renovável do Aquífero Cauê –, causando redução média do nível d'água de 10,4 m entre 1999 e 2019, com valores de até 80 m próximos às cavas, e redução de 13,6% no fluxo de base dos rios da região. O flanco oeste do Sinclinal apresenta déficit hídrico de 3.391 m³/h desde 2019, com rebaixamentos de até 140 m nas cavas mais profundas ao sul. As projeções para 2019-2039 indicam rebaixamento adicional de 7,4 m e redução de mais 7,6% no fluxo de base, comprometendo a perenidade de córregos como o Cascalheira (projeção de -54,1%) e o Fechos (-14,7%) e ameaçando o abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, que depende do Rio das Velhas como principal fonte hídrica.

Na escala da Bacia do São Francisco, o armazenamento subterrâneo apresenta tendência de -26 mm/ano desde o El Niño de 2015/2016 (ante -6 mm/ano no período anterior), com o Aquífero Urucuia tendo perdido aproximadamente 31 km³ de água entre 2002 e 2023. Mais de 61% dos rios avaliados na Bacia do São Francisco são potencialmente perdedores, com o nível freático já abaixo da superfície d'água dos rios afluentes. Na Unidade de Gerenciamento do Verde Grande essa proporção atinge 74%.

O diagnóstico de perdas hídricas em Minas Gerais e na Bacia do São Francisco é consistente com o quadro nacional identificado por Chagas, Chaffe e Blöschl (2022). Os autores demonstram que,

nas últimas quatro décadas, 42% do território brasileiro, incluindo todo o Planalto Central e o centro-leste do país, encontra-se em trajetória de ressecamento (*drying*), com redução simultânea das cheias e agravamento das estiagens associados à queda do balanço hídrico e ao crescimento exponencial do uso da água para irrigação. Nessa zona, o evento de seca com período de retorno de 10 anos em 1980 tornou-se evento anual recorrente em 2015. O uso da água ampliou os efeitos climáticos sobre as secas hidrológicas, tornando as estiagens mais severas do que a variabilidade pluviométrica sozinha explicaria.

A irrigação agrícola responde por 86,6% do consumo hídrico na Bacia do Paracatu e 90% na Bacia do Verde Grande. A contribuição do Urucuia ao Rio São Francisco caiu de 792 m³/s em 1980 para 390 m³/s em 2015, redução superior a 50% em 35 anos atribuída principalmente ao bombeamento para irrigação. Oito áreas do Norte de Minas já atingiram 100% do limite outorgável de águas subterrâneas, inviabilizando novas concessões.

O quadro é agravado pelas projeções de expansão de mais de 50% das áreas irrigadas nos próximos 20 anos e pela perspectiva de redução de até 70% na recarga do semiárido por mudanças climáticas. A reversão desse cenário exige a adoção urgente de limites de outorga baseados na recarga efetiva e no fluxo de base mínimo dos rios, a regulamentação do rebaixamento dos lençóis freáticos nas minas, com reposição compensatória quando a extração superar a recarga, o controle do desmatamento nas zonas de recarga do Cerrado, e a integração do monitoramento piezométrico com dados de satélite para rastreamento em tempo real das tendências de depleção em ambas as escalas – local (Sinclinal Moeda) e regional (Bacia do São Francisco).

As tendências constatadas pelos e as informações referentes ao aumento e aprofundamento das áreas mineradas e a expansão das áreas agrícolas nos últimos anos permitem afirmar que a situação atual dos aquíferos é grave e que medidas urgentes são necessárias para evitar colapsos no abastecimento de água de núcleos urbanos e perdas expressivas nas atividades produtivas.

2 Conclusões

A análise integrada dos diversos estudos que fundamentam esta Nota Técnica permite formular as seguintes conclusões sobre a situação hídrica do estado de Minas Gerais:

A Bacia do Rio São Francisco situa-se no epicentro da crise de recursos hídricos subterrâneos do Brasil central. A combinação de secas climáticas intensificadas (especialmente após o El Niño de 2015/2016), extração insustentável de água subterrânea para irrigação, atividade minerária com rebaixamento contínuo do lençol freático e desmatamento do Cerrado nas zonas de recarga gerou um **quadro de depleção severa e acelerada do armazenamento subterrâneo, com tendência de -26 mm por ano no período pós-2015** (CAMACHO, 2025; GETIRANA et al., 2026).

O processo de rios perdedores é predominante na bacia, com mais de 61% dos rios avaliados classificados como potencialmente perdedores (UCHÔA et al., 2024). Na Unidade de Gerenciamento do Verde Grande, afluente do São Francisco no norte de Minas Gerais, essa proporção atinge 74%, indicando que o rebaixamento do lençol freático inverteu o gradiente hidráulico natural em grande parte do sistema fluvial, reduzindo o fluxo de base e comprometendo a perenidade dos rios.

O Aquífero Urucuia, responsável pela manutenção do fluxo de base do São Francisco em seu médio curso, perdeu cerca de 31 km³ de água durante o período 2002-2023, com recarga zero registrada em determinados anos hidrológicos e taxa de recarga média de apenas 10% da precipitação, valor inferior ao esperado para as condições naturais do sistema (CAMACHO, 2025).

Os **demais sistemas aquíferos** associados ao território mineiro, incluindo o Bauru-Caiuá, o Guarani (zona de afloramento) e o Bambuí em sua porção terrígena, apresentam **tendências negativas de armazenamento, com aceleração das perdas após 2015**. A exceção são as bacias da vertente atlântica durante períodos de La Niña, que apresentam ganhos moderados de armazenamento, embora esses ganhos carreguem o risco associado de maior probabilidade de inundações (GETIRANA et al., 2026; CAMACHO, 2025).

O Sinclinal Moeda representa o caso mais grave e documentado de superexploração minerária de aquíferos no Brasil central, Os efeitos hidrológicos dessa mineração se propagam pela bacia do Rio das Velhas até o São Francisco e potencialmente alcançam as bacias do Atlântico Sudeste e Atlântico Leste (GETIRANA et al., 2026; CAMACHO, 2025).

No Sinclinal Moeda, o Aquífero Cauê é a unidade mais produtiva e hidrológicamente mais crítica, com taxa de recarga entre 26% (flanco oeste) e 38,67% (flanco leste) da precipitação, sendo responsável por aproximadamente 63% do fluxo de base dos rios da região. **A extração de água subterrânea pela mineração no flanco leste atingiu 52 milhões de m³/ano em 2019, equivalente a mais de 150% da reserva renovável do Aquífero Cauê, causando declínio do armazenamento de 134,4 mm/ano no armazenamento subterrâneo de uma área de 305 km² – detectável por satélites GRACE.** O rebaixamento médio do nível d'água entre 1999 e 2019 foi de 10,4 m no Aquífero Cauê no flanco leste, com valores de até 80 m em piezômetros próximos às cavas. No **flanco oeste**, o déficit hídrico atingiu 3. 391 m³/h em 2019, com rebaixamentos de até 140 m junto às cavas mais profundas na porção sul, evidenciando que **a superexploração supera a reserva renovável do Cauê desde 2009 neste flanco.**

Em ambos os flancos, o bombeamento intenso causou reversão progressiva do fluxo entre as unidades aquíferas: o Aquífero Cauê, que em condições naturais funciona como divisor de águas e fornece fluxo ao Gandarela, ao Batatal e ao Moeda, passou a capturar água dessas unidades adjacentes. **Esse fenômeno representa um esgotamento mais amplo do sistema hídrico do Sinclinal do que indicado apenas pelos volumes extraídos do Cauê.**

As projeções para 2019-2039 indicam rebaixamento adicional médio de 7,4 m no flanco leste (10,8 m no Setor Central 2), com redução adicional de 7,6% do fluxo de base, comprometendo a perenidade de córregos como o Cascalheira (redução projetada de 54,1%) e o Fechos (14,7%). **A continuidade desse processo ameaça diretamente o abastecimento de Belo Horizonte e da RMBH, que depende do Rio das Velhas como principal fonte hídrica.**

Na **Bacia do Rio São Francisco como um todo**, a tendência de depleção do armazenamento subterrâneo acelerou de -6 mm/ano (2002-2015) para -26 mm/ano (2015-2023) após o El Niño de 2015/2016. O Aquífero Urucuia perdeu aproximadamente 31 km³ entre 2002 e 2023, e **mais de 61% dos rios avaliados na bacia são potencialmente perdedores, com o nível freático já abaixo da superfície d'água dos rios adjacentes, indicando perda líquida de água dos rios para os aquíferos.** As projeções climáticas apontam para reduções de até 70% na recarga do semiárido, combinadas com expansão de 50% das áreas irrigadas.

A irrigação agrícola constitui o vetor de maior pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos em Minas Gerais, respondendo por 46% das retiradas totais nos corpos hídricos do país e por parcelas ainda maiores em bacias críticas como as do Rio Paracatu (86,6% do consumo total) e do Rio Verde Grande (90% do consumo). Com Paracatu e Unaí figurando como o segundo e terceiro maiores municípios irrigantes do Brasil em área irrigada por pivôs centrais – 88. 889 ha e 81. 246 ha, respectivamente (GUIMARÃES; LANDAU, 2024) – **o Noroeste mineiro concentra uma das demandas hídricas mais intensas do território nacional, gerando conflitos declarados pelo IGAM em múltiplas sub-bacias e inviabilizando a emissão de novas outorgas em pelo menos oito áreas do Norte de Minas que já atingiram 100% do limite outorgável.** A contribuição do Aquífero Urucuia ao Rio São Francisco, que sustentava uma descarga média de 792 m³/s em 1980, caiu para apenas 390 m³/s em 2015, **redução superior a 50% em 35 anos diretamente**

associada ao bombeamento para irrigação (GONÇALVES et al., 2020 apud LUCAS et al., 2021). Rodrigues et al. (2024) demonstraram que o bombeamento, e não a variabilidade climática, é o **principal fator causador da seca nas bacias do Urucuia**, com aumentos na duração dos períodos de baixa vazão de até 1.315% e déficits de até 7.150% em relação às condições naturais estimadas.

A gestão sustentável desse quadro é dificultada por um **ciclo de retroalimentação negativa**: a irrigação depleciona os aquíferos, que reduzem o fluxo de base dos rios, o que leva à perfuração de novos poços para compensar a queda da disponibilidade superficial, aprofundando ainda mais a depleção subterrânea. Esse ciclo é agravado pelo desmatamento do Cerrado nas zonas de recarga, pela subnotificação de poços operando sem outorga ou como uso insignificante, e pelas projeções de expansão de mais de 50% das áreas irrigadas nos próximos 20 anos (UCHÔA et al., 2024) combinadas com a redução de até 70% na recarga do semiárido em cenários de mudanças climáticas (HIRATA; CONICELLI, 2012 apud GETIRANA et al., 2026).

De acordo com o trabalho recente de Chagas, Chaffe e Blöschl (2026) **nos 45 anos decorridos de 1980 a 2025, as vazões dos períodos de seca nos rios de Minas Gerais reduziram-se de 54% a 81% praticamente o estado**. Em algumas áreas no extremo sul e no extremo oeste essas vazões reduziram-se de 6% a 12% por década, totalizando de 27% a 54% no mesmo período.

As vazões dos períodos úmidos também se reduziram em todo o estado, exceto em uma pequena área do sudeste. As reduções em 45 anos foram de 54% a 81% no extremo norte, de 27% a 54% nas áreas norte, noroeste, parte do Triângulo e extremo sul e de menos de 27% em faixas do leste e do centro do estado.

O ressecamento do ciclo hidrológico no Planalto Brasileiro não é fenômeno exclusivamente climático, mas resultado da amplificação dos efeitos das mudanças no regime de chuvas pelo crescimento exponencial do uso da água para irrigação. Chagas, Chaffe e Blöschl (2022), com base em 886 estações hidrométricas no período 1980-2015, demonstraram que nas zonas agrícolas do centro-leste do Brasil – onde se inserem as bacias mineiras do São Francisco – as tendências de redução das **vazões de estiagem tornaram-se progressivamente independentes da variabilidade pluviométrica a partir de 2000, passando a ser determinadas principalmente pelo crescimento das captações para irrigação.**

A reversão desse quadro, portanto, não pode ser obtida apenas pela espera de anos mais chuvosos: **enquanto as outorgas não forem calibradas pelos limites reais de recarga e enquanto o desmatamento nas zonas de recarga prosseguir, cada seca climática produzirá secas hidrológicas proporcionalmente mais severas do que as décadas anteriores.**

A gestão futura dos recursos hídricos na Bacia do São Francisco e nas demais bacias mineiras exige uma abordagem integrada que considere, de forma indissociável, as águas superficiais e subterrâneas como um único sistema. São necessários:

1. o estabelecimento de limites de outorga baseados na recarga real monitorada e no fluxo de base, e não apenas na estimativa histórica, medida indispensável à perenidade dos rios;
2. o fortalecimento das redes de monitoramento de poços (RIMAS) e a integração com dados de satélite GRACE para rastreamento em tempo real das tendências de depleção
3. a regulamentação das taxas de rebaixamento do lençol freático em áreas de mineração com reposição compensatória quando as extrações superarem a recarga;
4. o controle do desmatamento nas zonas de recarga dos principais aquíferos, especialmente nodo Cerrado;
5. a implementação de redes de monitoramento hidrométricas mais densas e representativas em ambos os flancos do Sinclinal Moeda;

6. o monitoramento contínuo e em tempo real das extrações para irrigação, especialmente nas bacias do Rio Paracatu e do Rio Verde Grande, onde os sinais de colapso hídrico já são evidentes e documentados;
7. o planejamento de longo prazo das outorgas de uso da água subterrânea considerando a trajetória de depleção já instalada e as projeções climáticas futuras e
8. a integração entre as políticas de outorga de água subterrânea e o licenciamento ambiental do desmatamento nas áreas de recarga.

3 Objetivo

O objetivo central desta Nota Técnica é sistematizar, de forma coerente e acessível, as evidências científicas disponíveis sobre as perdas e, onde existentes, os ganhos hídricos na Bacia do Rio São Francisco e em outras bacias relevantes do estado de Minas Gerais, identificando os principais processos causadores e apontando as implicações para a gestão integrada dos recursos hídricos. De forma especial, são apresentadas as informações sobre a situação dos flancos leste e oeste do Sinclinal Moeda, situado no extremo sul da bacia do São Francisco.

4 Introdução

A Bacia do Rio São Francisco é um dos sistemas hídricos mais estratégicos do Brasil, atravessando seis estados (Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Goiás) e abastecendo milhões de pessoas em regiões historicamente vulneráveis à seca. Localizado no Quadrilátero Aquífero-Ferrífero, no estado de Minas Gerais, o Sinclinal Moeda integra a sub-bacia do Rio das Velhas, principal afluente do São Francisco, e representa uma das áreas de maior pressão minerária sobre os recursos hídricos subterrâneos do país. O estado de Minas Gerais, em razão de sua posição geográfica central, da diversidade de seus sistemas aquíferos e da intensidade de suas atividades econômicas, ocupa papel de destaque nas discussões sobre a sustentabilidade hídrica do Brasil.

Nas últimas décadas, estudos de base observacional, experimental e de modelagem têm documentado tendências preocupantes de queda dos níveis das águas subterrâneas e redução das vazões dos rios em diversas sub-bacias do São Francisco e em outras bacias mineiras. Esses processos decorrem de múltiplos fatores que atuam de forma simultânea e sinérgica: o uso intensivo das águas subterrâneas para irrigação e abastecimento urbano, o rebaixamento forçado do lençol freático pela mineração (*dewatering*), o desmatamento do Cerrado nas zonas de recarga, a influência de eventos climáticos de grande escala como o El Niño e a La Niña, além das projeções de redução de precipitação decorrentes das mudanças climáticas globais.

A presente Nota Técnica sintetiza os resultados de vários trabalhos recentes de alta relevância científica que abordam, de diferentes perspectivas e escalas espaciais, as perdas e ganhos hídricos nessa região. No âmbito nacional e da bacia do São Francisco, os estudos de Getirana et al. (2026), Camacho (2025) e Uchôa et al. (2024) oferecem diagnósticos de escala regional baseados em modelagem por inteligência artificial, dados de satélite e análise de milhares de poços. No âmbito específico do Sinclinal Moeda, os trabalhos de Magalhães et al. (2022), Pacheco Neto et al. (2026), Andrade et al. (2025) e Andrade et al. (2023) aprofundam a caracterização hidrogeológica dos aquíferos de ambos os flancos do Sinclinal, quantificando os impactos da mineração com base em dados de campo, testes de bombeamento, monitoramento piezométrico e modelagem numérica.

Adicionalmente, os trabalhos de Lucas et al. (2021), Rodrigues et al. (2024), Guimarães e Landau (2024), e os dados do Atlas Irrigação da ANA (2021) sustentam o diagnóstico sobre as perdas

hídricas provocadas pela irrigação agrícola, com foco nas bacias do Rio Paracatu e do Rio Verde Grande, situadas no Noroeste e no Norte de Minas Gerais.

A Fig.1 a seguir, cópia da Fig. 3 do trabalho de Getirana et al. (2026), mostra as tendências emergentes do armazenamento subterrâneo no Brasil de julho/2002 a outubro/2023 (21 anos). de classificação das regiões de ganho, perda moderada, perda severa e sem tendência, com a Região 3 (depleção severa) centrada em Minas Gerais e na Bacia do São Francisco.

A figura apresenta o mapa dos padrões espaciais das tendências emergentes de armazenamento de água subterrânea que foram identificados usando uma abordagem de agrupamento por máquina de vetores de suporte (SVM), resultando em sete regiões distintas. A região 1 exibiu uma forte tendência positiva de armazenamento, as regiões 2 e 4 mostraram declínios moderados no armazenamento e **a Região 3 (depleção severa) centrada em Minas Gerais e na Bacia do São Francisco, foi caracterizada por um esgotamento severo do armazenamento.** Nenhuma tendência estatisticamente significativa foi detectada nas regiões 5 e 6. A região 7 mostra uma tendência positiva de armazenamento. A Fig. 1 inclui também o mapa de tendência de variação do armazenamento de água subterrânea GWS (*Groundwater storage*) em mm/ano, revelando perdas de água em todo o estado de Minas Gerais, além de perdas maiores no sudoeste da Bahia e no Centro-Oeste.

A Fig. 1, na qual foram inseridos os limites do estado de Minas Gerais, é uma das mais relevantes para demonstrar visualmente as perdas hídricas no país e na área de interesse da presente Nota Técnica e, por meio dela, pode-se ver que **as perdas mais extensas e maiores do Brasil ocorrem em Minas Gerais.**

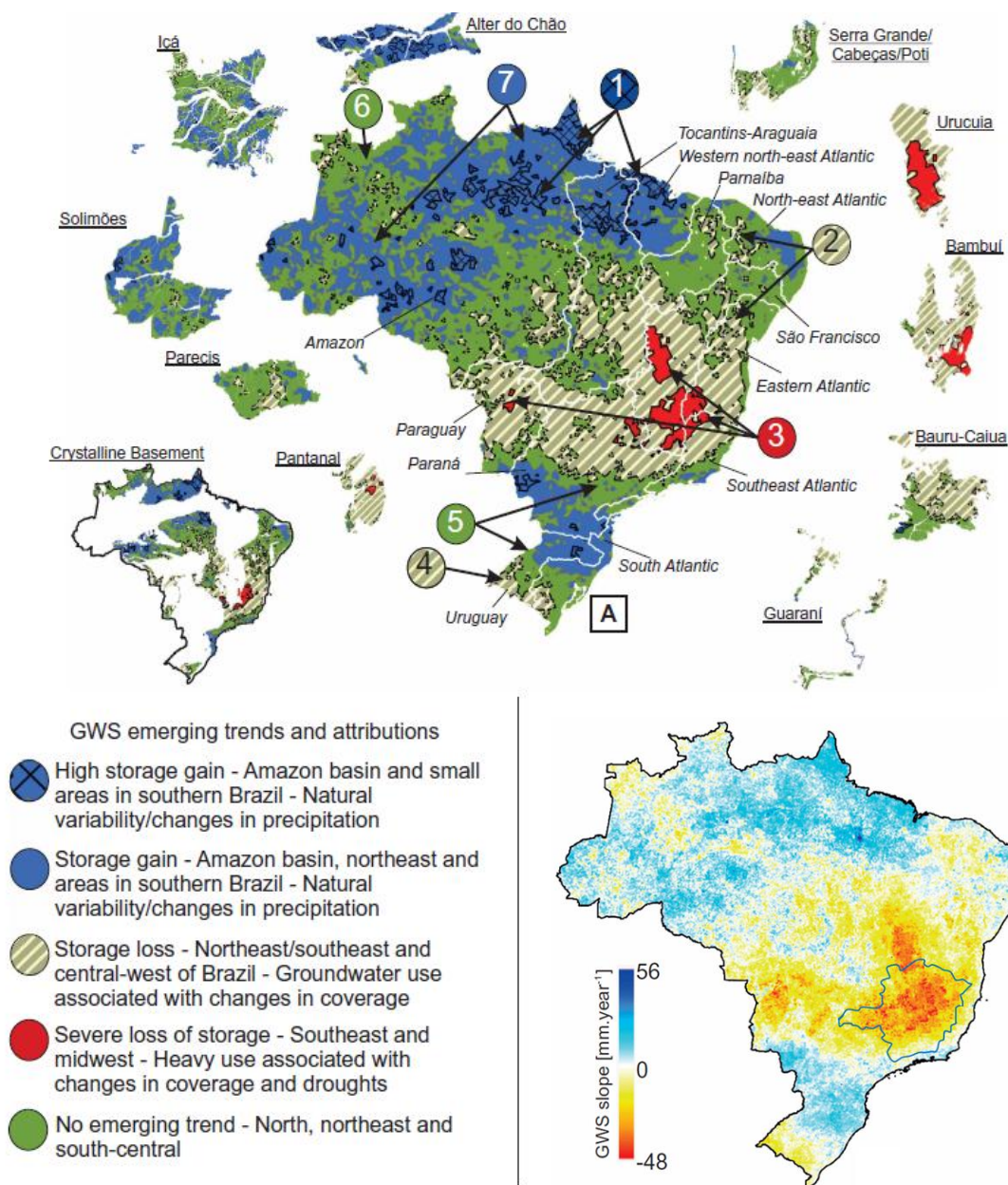


Fig. 1. Tendências emergentes de armazenamento de água subterrânea no Brasil (julho de 2002 a outubro de 2023). (A) Classificação das tendências emergentes de armazenamento de água subterrânea. (B) Tendência de armazenamento de água subterrânea (mm ano^{-1}) derivada de anomalias de armazenamento de água subterrânea. As tendências emergentes de armazenamento de água subterrânea foram classificadas usando uma abordagem de agrupamento por máquina de vetores de suporte (SVM) (57) em 12 bacias hidrográficas – Amazonas, Tocantins-Araguaia, Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, Atlântico Nordeste, São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste, Uruguai, Paraná, Atlântico Sul e Paraguai – e 11 sistemas aquíferos principais: Alter do Chão, Serra Grande-Cabeças-Poti, Urucua, Bambuí, Bauru-Caiuá, Guarani, Pantanal, Base Cristalina, Parecis, Solimões e Içá. A classificação captura regiões de ganho, perda, depleção severa e tendências neutras de armazenamento, fornecendo contexto espacial para a variabilidade e o estresse das águas subterrâneas em todo o Brasil. [GWS = *Groundwater storage* (Armazenamento de água subterrânea)]. **Fonte:** Getirana et. al (2026), Fig. 3.

Legenda: Tendências emergentes e atribuições do armazenamento de água subterrânea (tradução livre)

-  Alto ganho de armazenamento - Bacia Amazônica e pequenas áreas no sul do Brasil - Variabilidade natural/mudanças na precipitação
-  Ganho de armazenamento - Bacia Amazônica, Nordeste e áreas no sul do Brasil - Variabilidade natural/mudanças na precipitação
-  Perda de armazenamento - Nordeste/Sudeste e Centro-Oeste do Brasil - Uso de água subterrânea associado a mudanças na cobertura
-  Perda severa de armazenamento - Sudeste e Centro-Oeste - Uso intenso associado a mudanças na cobertura e secas
-  Sem tendência emergente - Norte, Nordeste e Centro-Sul

5 O Déficit Hídrico no Brasil: Contexto Nacional

5.1 O agravamento da crise hídrica e seu reflexo nas águas superficiais e subterrâneas

O Brasil detém a maior reserva de água doce renovável do planeta, respondendo por cerca de 20% do escoamento continental total para os oceanos (GETIRANA, 2016; GETIRANA et al., 2026). Paradoxalmente, o país vivenciou, **nas últimas três décadas, três grandes crises hídricas nacionais** – em 2000-2001, 2014-2017 e 2021 –, cada uma delas intensificada por eventos climáticos extremos e pela excessiva dependência de fontes superficiais de água (GETIRANA et al., 2026). Esse quadro revela uma **vulnerabilidade estrutural** que não decorre da escassez absoluta de recursos hídricos, mas da combinação de distribuição espacialmente desigual da água, de pressões antrópicas crescentes e de insuficiência das políticas de monitoramento e governança.

O estudo pioneiro de Getirana (2016), publicado no *Journal of Hydrometeorology*, utilizou dados da missão gravimétrica GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) para quantificar, pela primeira vez a partir do espaço, o déficit hídrico extremo que atingiu o leste do Brasil a partir de 2012. O trabalho demonstrou que a seca estabelecida no período 2012-2015 foi a mais severa registrada nas últimas décadas, com taxa de perda de água de 6,1 cm/ano no Sudeste e 3,2 cm/ano no Nordeste, correspondentes a volumes anuais de 56 km³ e 49 km³, respectivamente.

O ponto mais crítico dessa seca ocorreu em janeiro de 2015, quando o déficit de armazenamento terrestre de água (*Terrestrial Water Storage Anomaly* – TWSA) no Sudeste atingiu -15,7 cm (-146 km³), o nível mais baixo já observado pelo satélite. O estudo evidenciou que uma redução de 20% a 23% na precipitação ao longo de três anos consecutivos é suficiente para gerar condições severas de escassez hídrica no país, com impactos diretos sobre o abastecimento de água de 20 milhões de habitantes de São Paulo, sobre a geração de energia hidrelétrica – responsável por mais de 70% da eletricidade consumida no Brasil – e sobre a produção agrícola. O reservatório Cantareira, principal sistema de abastecimento do estado de São Paulo, atingiu em setembro de 2014 apenas 10,7% de sua capacidade total, contra 80,6% registrados em 2011 (GETIRANA, 2016).

Cinco anos depois, **o artigo de opinião de Getirana, Libonati e Cataldi (2021), publicado na revista Nature e assinado por 95 cientistas brasileiros e internacionais, demonstrou que a crise não apenas se manteve, mas se intensificou.** Entre março e maio de 2021, a região centro-sul do Brasil registrou um déficit de 267 km³ no armazenamento total de água em relação à média sazonal das duas décadas anteriores. O resultado foi a elevação de 130% nas contas de eletricidade, alta de 30% no preço do café (o Brasil responde por um terço das exportações mundiais) e aumento de 67% no preço da soja entre junho de 2020 e maio de 2021. Os reservatórios da Bacia do Rio Paraná atingiram os níveis mais baixos em 91 anos, enquanto o país passou a gerar 13,2% de sua eletricidade por termelétricas a combustíveis fósseis e biocombustíveis – a maior proporção de sua história (GETIRANA et al., 2021).

Ambos os estudos convergem ao identificar a redução da precipitação como o gatilho imediato dos déficits hídricos, mas o artigo de 2021 amplia o diagnóstico ao incorporar fatores antrópicos estruturais. O **desmatamento da Amazônia, ao reduzir os chamados “rios voadores”** (*flying rivers*) – fluxos atmosféricos de umidade gerados pela transpiração das árvores, capazes de transportar volumes diários de água equivalentes aos do próprio Rio Amazonas –, diminui a precipitação sobre as regiões agrícolas e hidrelétricas do centro-sul. O **manejo inadequado do solo, a pecuária intensiva e a compactação dos solos** reduzem a capacidade de retenção de água e a recarga dos aquíferos. Por décadas, a **omissão governamental em tratar a seca como questão de segurança nacional** e internacional, aliada ao **negacionismo científico e a políticas que incentivaram a ocupação irregular do solo por agronegócio e mineração**, agravaram estruturalmente a vulnerabilidade hídrica do país (GETIRANA; LIBONATI; CATALDI, 2021).

Um ponto crítico evidenciado por ambos os trabalhos é a **insuficiência da infraestrutura de monitoramento hídrico**. Em 2016, Getirana já alertava para os limites da rede de poços no Brasil. Em 2021, os autores expuseram a discrepância de forma quantitativa: enquanto o Brasil monitorava apenas 409 poços de águas subterrâneas em todo o território nacional, os Estados Unidos operavam mais de 16.000 e a Índia mais de 22.000, e não existia nenhum sistema nacional de monitoramento de umidade do solo (GETIRANA et al., 2021). Getirana et al. (2026) atualizaram esses números: a rede federal passou a contar com cerca de 500 poços – aumento modesto que ainda mantém a cobertura nacional esparsa e desigual. Essa escassez de dados dificulta a calibração de modelos hidrológicos, a validação das observações por satélite e a tomada de decisão em tempo real.

O estudo mais recente, Getirana et al. (2026), publicado na revista *Science Advances* em junho de 2026, representa o primeiro diagnóstico nacional e baseado em observações do comportamento das águas subterrâneas do Brasil ao longo de duas décadas (2002-2023). Integrando dados de múltiplos satélites (GRACE/GRACE-FO, MODIS e GPM) com medidas de 398 poços da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) do Serviço Geológico do Brasil em um modelo de inteligência artificial (IA), o estudo gerou quase 20 milhões de estimativas mensais de armazenamento de água subterrânea (*Groundwater Storage – GWS*) em 87.367 pontos de grade com resolução de 0,1° em todo o país. Esse nível de detalhe, antes inviável pela insuficiência de dados de campo, confirma e quantifica as dinâmicas que os estudos de 2016 e 2021 haviam identificado, agora com cobertura espacial e temporal sem precedentes.

Os resultados de Getirana et al. (2026) revelam que a **recarga média anual de água subterrânea no Brasil durante o período 2002-2023** foi de 223 ± 16 mm/ano, correspondendo a um volume total de aproximadamente 1.900 ± 136 km³/ano – **equivalente a cerca de 12% da precipitação média anual nas áreas de afloramento estudadas**. A variabilidade espacial é considerável: os aquíferos cársticos do Bambuí capturam até 18% da precipitação local, enquanto os aquíferos fraturados recargam apenas 5%, e os granulares apresentam média de 12,5%. Temporalmente, o menor valor nacional de recarga foi registrado em 2015 (159 ± 16 mm/ano, ou 1.354 ± 136 km³/ano), ano que coincidiu com a seca generalizada que precipitou a crise hídrica nacional; o maior valor foi registrado em 2021 (274 ± 16 mm, ou 2.333 ± 136 km³/ano), em função do recorde de chuvas na Amazônia (GETIRANA et al., 2026).

A análise de tendências emergentes de Getirana et al. (2026) classificou o território nacional em sete regiões hidroclimaticamente distintas. A Região 1, abrangendo principalmente a Bacia do Amazonas e áreas pontuais do Sul, apresenta tendência positiva forte de armazenamento. A Região 7 exhibe ganho moderado, impulsionado pelo aumento de precipitação. As Regiões 2 e 4 mostram declínios moderados, associados principalmente à conversão de floresta tropical e Cerrado em terras agrícolas no sul da bacia Amazônica e à abstração local de água subterrânea. A **Região 3, que engloba o centro-oeste e sudeste do Brasil, com epicentro em Minas Gerais e na Bacia do Rio São Francisco, foi caracterizada como a área de depleção mais severa do país**, resultante da combinação de uso intensivo de água subterrânea, secas severas, mudanças

climáticas antropogênicas e alterações no ciclo hidrológico regional (GETIRANA et al., 2026). Nas áreas com tendência negativa significativa em todo o Brasil, **a perda acumulada de armazenamento subterrâneo entre 2002 e 2023 foi estimada em 524,98 km³** (CAMACHO, 2025).

O papel dos eventos ENOS (El Niño-Oscilação Sul) é determinante para a variabilidade interanual do armazenamento subterrâneo. Getirana et al. (2026) demonstraram que o **El Niño 2015/2016, de intensidade excepcional, promoveu uma mudança estrutural no comportamento dos aquíferos brasileiros**: nas bacias afastadas da modulação costeira, a transição de tendências fracamente positivas ou neutras para negativas generalizadas evidencia a capacidade de eventos climáticos extremos de alterar a dinâmica hídrica subterrânea de longo prazo. Na **Bacia do São Francisco**, especificamente, a análise de Camacho (2025) revelou que a tendência de armazenamento subterrâneo passou de **-6 mm/ano (2002-2015) para -26 mm/ano (2015-2023)**, representando intensificação de mais de quatro vezes. Em contrapartida, eventos La Niña estão associados a ganhos de armazenamento nas bacias costeiras do Atlântico Sul e Sudeste, embora elevados níveis subterrâneos nessas áreas reduzam a capacidade de infiltração, aumentando o escoamento superficial e o risco de enchentes (GETIRANA et al., 2026).

A depleção subterrânea observada no Brasil replica padrões já documentados em aquíferos intensamente explorados em outras partes do mundo, como o Vale Central da Califórnia, as Grandes Planuras dos Estados Unidos, o Zayandeh-Rud no Irã e os aquíferos do norte da Índia e de Bangladesh, todos caracterizados por **declínios severos do nível d'água** (GETIRANA et al., 2026). **O princípio comum é o mesmo: avaliações de disponibilidade focadas apenas na capacidade de extração, sem incorporar o comportamento hidrogeológico regional e os efeitos da variabilidade climática, tendem a desencadear depleção irreversível de longo prazo.** No Brasil, essa dinâmica já é visível no centro do país, em especial no Nordeste – onde projeções apontam redução de até 70% na recarga do semiárido em cenários de mudanças climáticas – e no Cerrado, onde a combinação de conversão do solo, irrigação intensiva e secas prolongadas avança sobre as reservas dos grandes sistemas aquíferos (HIRATA; CONICELLI, 2012 apud GETIRANA et al., 2026).

Diante desse quadro, Getirana et al. (2021) propuseram um conjunto de medidas estruturantes que permanece inteiramente válido:

- (i) investimento de US\$ 20 milhões em novo supercomputador nacional para produção de previsões hidrometeorológicas de alta resolução (o orçamento do ministério de ciência e tecnologia para 2022 havia sido reduzido em 87%);
- (ii) expansão e integração das redes de monitoramento de águas subterrâneas e umidade do solo;
- (iii) diversificação da matriz energética, ampliando as fontes solar e eólica (com potencial estimado de 300 GW até 2050, o triplo da demanda nacional atual) em substituição à dependência excessiva de hidrelétricas, que respondem por 65% da eletricidade nacional;
- (iv) uso planejado e sustentável dos aquíferos como reserva estratégica para a agricultura durante secas hidrológicas, evitando a depleção observada em outros países; e
- (v) tratamento da água como prioridade de segurança nacional e internacional, com elaboração de um plano nacional de mitigação de secas que envolva pesquisadores, formuladores de políticas, setor privado e sociedade civil.

A inobservância dessas recomendações ao longo dos anos seguintes é corroborada pelos resultados de Getirana et al. (2026), que documentam a continuidade e a aceleração das perdas hídricas no Brasil ao longo das duas décadas subsequentes.

NOTA:

Há um desenvolvimento recente que atende parcialmente à primeira recomendação de Getirana et al. (2021). Em 11 de dezembro de 2025, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) inauguraram o supercomputador Jaci, instalado no Centro de Dados Científico do INPE em Cachoeira Paulista (SP). Com custo de R\$ 30 milhões nesta primeira fase, o Jaci substitui o antigo supercomputador Tupã e representa capacidade de processamento até seis vezes superior e armazenamento 24 vezes maior que seu antecessor. Ele é o primeiro componente do Projeto RISC (Renovação da Infraestrutura de Supercomputação do INPE), que prevê investimentos totais de aproximadamente R\$ 200 milhões até 2028, incluindo a instalação de mais três supercomputadores e a ampliação da infraestrutura elétrica, de refrigeração e de geração de energia solar, com potencial de alcançar pelo menos 8 petaflops de capacidade total (INPE, 2025; MCTI, 2025).

O Jaci chegou ao INPE em maio de 2025 e passou por série de testes até a inauguração oficial. Em operação, o Jaci passou a processar os dados meteorológicos quatro vezes por dia, contra duas do Tupã, e permite rodar modelos com resolução espacial de até 3 km – um salto em relação aos 20 km do sistema anterior – possibilitando a identificação de fenômenos locais como ondas de calor em áreas específicas de grandes cidades, tempestades intensas em regiões delimitadas e efeitos de serras e vales sobre o regime de chuvas (INPE, 2025). Até 2028, o sistema deve incorporar dados de qualidade do ar e concentração de gases de efeito estufa, ampliando sua utilidade para a previsão de cenários de mudanças climáticas.

Embora ainda em fase inicial de operação regular e sem avaliações de desempenho publicadas em periódicos científicos até a data de elaboração desta Nota Técnica, os resultados técnicos já divulgados pelo INPE são animadores e consolidam o Brasil como um dos poucos países do Hemisfério Sul com infraestrutura própria de supercomputação voltada especificamente para estudos climáticos de larga escala.

Contudo, o atendimento pleno à recomendação dos autores dependerá da efetiva integração do Jaci às redes de monitoramento hidrológico e subterrâneo – demanda que permanece em aberto – e da continuidade dos investimentos previstos no Projeto RISC ao longo da década.

5.2 Ressecamento e aceleração do ciclo hidrológico brasileiro: efeitos combinados do clima e do uso da terra

O estudo de Chagas, Chaffe e Blöschl (2022), publicado na *Nature Communications*, explica os processos e fornece a base quantitativa que sustentam e ampliam o diagnóstico de perda hídrica documentado pelos demais estudos desta Nota Técnica. Com uso dos dados diários de vazão de 886 estações hidrométricas distribuídas pelas principais bacias hidrográficas tropicais da América do Sul, cobrindo o **período de 1980 a 2015**, os autores demonstraram que o **uso da água e o desmatamento amplificaram os efeitos das mudanças climáticas** sobre os extremos hidrológicos, produzindo dois padrões espaciais dominantes no Brasil: o ressecamento (*drying*) e a aceleração (*acceleration*) do ciclo terrestre da água.

O padrão de ressecamento, caracterizado pela redução simultânea das enchentes e pelo aumento das secas, com menos água disponível tanto nos picos de cheia quanto nas estiagens, foi o padrão dominante, ocorrendo em 42% da área de estudo (3,9 milhões de km²), valor esse superior aos 35% esperados em uma distribuição aleatória. Esse padrão está diretamente associado à redução do balanço hídrico atmosférico (precipitação menos evapotranspiração, P – E) combinada com o aumento do uso da água em zonas agrícolas. O *hotspot* denominado Planalto Brasileiro (*Brazilian Highlands*), que abrange as regiões de agricultura intensiva a montante das Bacias do São Francisco e do Paraná, portanto cobrindo diretamente **Minas Gerais**

e seu entorno, é o epicentro desse padrão. Nessa região, a redução das vazões de estiagem está associada à queda do balanço hídrico médio e ao aumento da abstração de água, sendo que, a partir do ano 2000, as vazões de estiagem tornaram-se cada vez mais dissociadas do P – E médio em razão do **crescimento acelerado do uso da água para irrigação**. Esse dado é de extrema relevância: mesmo em anos sem déficit pluviométrico expressivo, a intensificação das captações fez cair os fluxos mínimos dos rios, sinalizando que **a pressão antrópica sobre os recursos hídricos subterrâneos e superficiais tornou-se, nessa região, o fator determinante das secas hidrológicas** (CHAGAS; CHAFFE; BLÖSCHL, 2022).

A análise de tendências das vazões de estiagem revelou tendência média de -5% por década em todo o domínio de estudo, com tendência regional de até -37% por década em sub-bacias do centro-leste do Brasil. Das 886 estações analisadas, 353 apresentaram tendência significativa de redução das vazões mínimas ($\alpha = 0,05$), ao passo que apenas 56 apresentaram aumento. As tendências de vazão de cheia foram de -1% por década em média, com 104 estações mostrando redução significativa. Nas bacias do centro-leste do Brasil, onde as reduções nas vazões de estiagem e os aumentos na abstração de água foram mais pronunciados, **o efeito do uso da água sobre as secas superou o efeito climático direto** (CHAGAS; CHAFFE; BLÖSCHL, 2022).

O segundo padrão identificado, a aceleração do ciclo hidrológico, caracteriza-se pelo aumento simultâneo da severidade das enchentes e das secas e ocorreu em 29% da área de estudo (2,7 milhões de km²), o dobro dos 15% esperados em uma distribuição aleatória com o nível de correlação observado entre as tendências de cheias e estiagens. Esse padrão é predominante na Amazônia meridional e está associado ao aumento das precipitações extremas na estação chuvosa, vinculado ao fortalecimento da circulação de Walker desde os anos 1990, e ao desmatamento em larga escala, que reduz a infiltração de água no solo por compactação e exposição do solo nu, aumentando o escoamento superficial nas cheias e diminuindo o fluxo de base nas estiagens.

Um resultado particularmente expressivo diz respeito à mudança dos períodos de retorno: a enchente de 100 anos registrada em 1980 na Amazônia meridional passou a ocorrer com período de retorno de apenas 25 anos em 2015. No sentido oposto, mas igualmente preocupante **para as regiões do Planalto Brasileiro, a seca com período de retorno de 10 anos em 1980 passou a ter período de retorno de apenas 1 ano em 2015 – o que significa que o que era evento extremo raro tornou-se evento anual recorrente** (CHAGAS; CHAFFE; BLÖSCHL, 2022).

A contribuição central do estudo é a separação estatística, por meio de regressões em painel com efeitos fixos por localização, dos efeitos relativos do clima e do uso da terra sobre as tendências hidrológicas. Os resultados mostram que, **nas tendências de estiagem, as principais variáveis explicativas são o P – E médio diário e o uso da água para irrigação e outros fins**, enquanto nas tendências de cheia prevalecem o P – E máximo de 14 dias (indicador de precipitação extrema) e o P – E médio.

A irrigação expandiu-se de 15.000 km² para 70.000 km² entre 1980 e 2015 (crescimento de 367%), respondendo por 68% do total do uso consuntivo de água no Brasil em 2017, com captações concentradas de maio a setembro – estação seca na maior parte do centro e leste do Brasil –, período em que o impacto sobre as vazões de estiagem é mais direto e severo (CHAGAS; CHAFFE; BLÖSCHL, 2022). Esse mecanismo de amplificação é diretamente aplicável à Bacia do Rio São Francisco e às bacias mineiras, onde Lucas et al. (2021), Rodrigues et al. (2024) e Uchôa et al. (2024) documentaram padrões análogos: **a irrigação com captação subterrânea opera de forma sinérgica com as tendências climáticas de ressecamento, tornando as secas hidrológicas mais severas e mais frequentes do que as tendências pluviométricas isoladas explicariam.**

Os resultados de Chagas, Chaffe e Blöschl (2022) indicam que a reversão do ciclo de ressecamento observado no centro-sul do Brasil exigirá não apenas adaptação às mudanças climáticas, mas a reforma simultânea das práticas de uso da água e da terra. **A simples espera por anos mais chuvosos não será suficiente enquanto a demanda hídrica agrícola e minerária continuar crescendo e o desmatamento nas zonas de recarga dos aquíferos prosseguir.**

No Planalto Brasileiro – zona que abrange diretamente Minas Gerais e a Bacia do São Francisco –, as secas recorrentes e as estiagens que se tornaram eventos anuais são hoje em parte resultado de décadas de escolhas de gestão do uso da água e da terra, e não apenas de variabilidade climática natural.

A Fig. 2 a seguir, na qual foram inseridos os limites do estado de Minas Gerais, é cópia da Fig. 5 do trabalho de Chagas, Chaffe e Blöschl (2026). Essa figura mostra a distribuição espacial dos quatro padrões (aceleração, desaceleração, ressecamento e umedecimento) com intensidade representada pela saturação das cores, acompanhado do diagrama explicativo dos quadrantes. Ela mostra de forma imediata e visualmente eloquente que Minas Gerais e a Bacia do São Francisco estão no epicentro da zona de ressecamento mais intensa de todo o território brasileiro, informação central para os objetivos desta Nota Técnica.

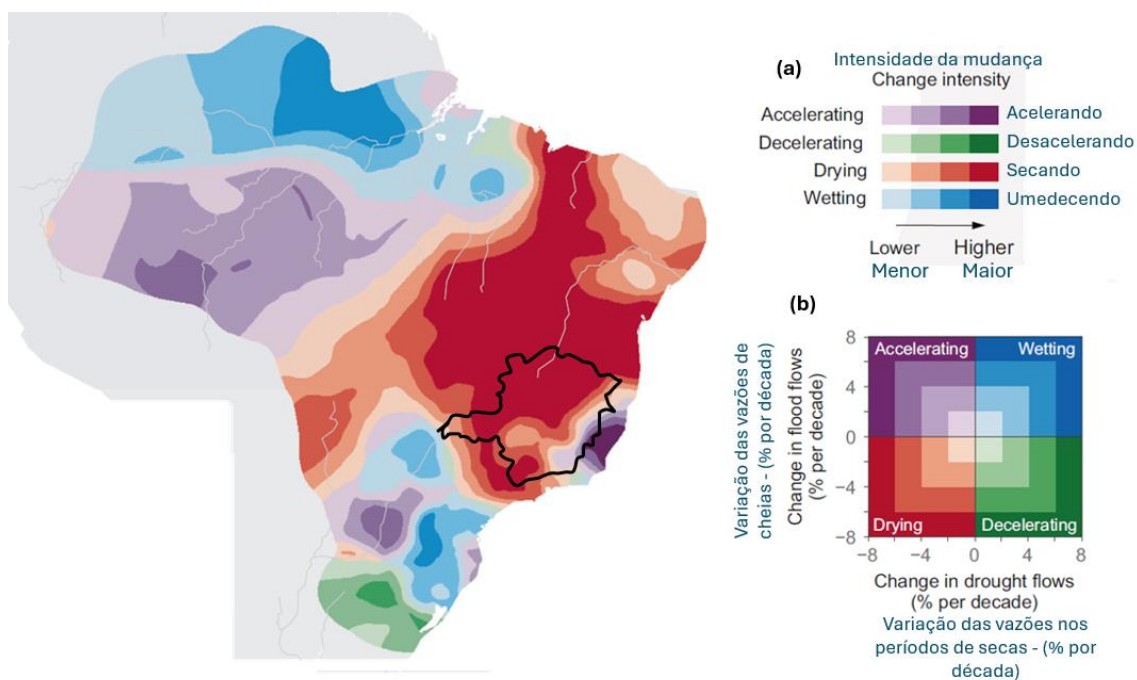


Fig. 2 – Distribuição espacial das tendências de aceleração, desaceleração, aumento da vazão e seca dos rios no Brasil no período de 1980 a 2015. (a) Localização dos quatro quadrantes das tendências regionais de vazão, com cores mais escuras indicando maiores intensidades de mudança. (b) Explicação do código de cores de (a). A aceleração do ciclo da água ocorreu em 29% da região (2,7 milhões de km²); a desaceleração em 4% (0,4 milhões de km²); a seca em 42% (3,9 milhões de km²); e o aumento da vazão em 25% (2,4 milhões de km²). **Fonte:** Chagas et. al (2022), Fig. 5.

Nota: Inserimos sobre a figura do artigo o mapa de Minas Gerais para evidenciar a situação do estado.

A Fig. 3 a seguir, cópia da Fig. 1 do trabalho de Chagas, Chaffe e Blöschl (2026), apresenta os mapas de tendência das vazões de estiagem e de cheia separadamente, com escala em % por década, permitindo quantificar as perdas regionais de forma mais detalhada. Os dados utilizados para gerar os mapas revelam que **as mudanças na vazão dos rios têm sido generalizadas no Brasil**. Uma diminuição adicional das vazões mínimas (ou seja, **aumento da severidade das secas**

hidrológicas) pode ser encontrada no sul da Amazônia e no centro-leste do Brasil (Fig. 3a), enquanto o aumento das vazões de cheia pode ser encontrado na Amazônia e em partes das regiões Sudeste e do Sul (Fig. 3b).

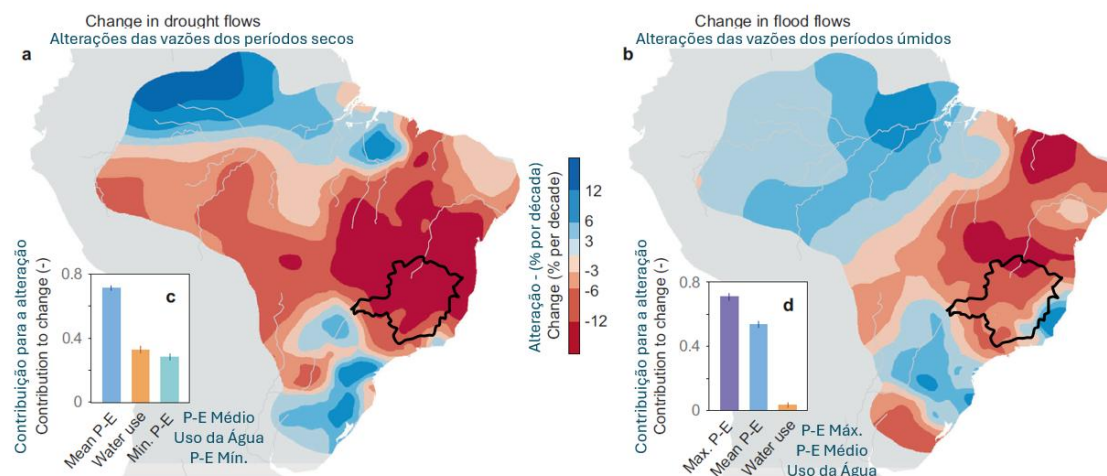


Fig. 3 – Tendências de vazão observadas e seus impulsionadores no Brasil (1980–2015). (a) - Mudança na vazão anual mínima de 7 dias ($Q_{7,10}$ - vazões de seca). (b) - Mudança na vazão diária máxima anual (vazões dos períodos úmidos). O azul e o vermelho indicam o aumento e a diminuição da vazão respectivamente (em percentagem de variação relativa à seca de longo prazo ou à vazão de cheia, por década). (c), (d) - Contribuições para a mudança nas vazões expressas como coeficientes de duas regressões em painel entre as vazões ($n = 25.682$ para secas e $n = 27.299$ para cheias) e valor $P - E$ médio diário (precipitação menos evaporação), $P - E$ mínimo anual de 90 dias, $P - E$ máximo anual de 14 dias e uso de água. Um coeficiente de 0,5 indica que uma alteração de 1% em um fator específico conduz, em média, a uma alteração de 0,5% nas vazões de secas ou cheias. As barras de erro representam o erro padrão. **Fonte: Chagas et. al (2022), Fig. 1.**

Nota: Inserimos sobre a figura do artigo o mapa de Minas Gerais para evidenciar a situação do estado.

De acordo com a Fig. 3, as vazões dos períodos de estiagem reduziram-se de 18% a 12% por década no período de 1980 a 2015. Se for considerado que essas tendências foram mantidas até 2025 (e é provável que tenham se agravado), **nos 45 anos decorridos de 1980 a 2025, as vazões dos períodos de seca reduziram-se de 54% a 81% praticamente em todo estado de Minas Gerais.** Em algumas áreas no extremo sul e no extremo oeste do estado essas vazões reduziram-se de 6% a 12% por década, totalizando de 27% a 54% no mesmo período.

As vazões dos períodos úmidos também se reduziram em todo o estado, exceto em uma pequena área do sudeste. As reduções em 45 anos foram de 54% a 81% no extremo norte, de 27% a 54% na área norte, noroeste, parte do Triângulo e extremo sul e de menos de 27% em faixas do leste e do centro do estado.

6 Caracterização Hidrogeológica da Região de Interesse

6.1 A Bacia do Rio São Francisco

A Bacia do Rio São Francisco possui área de drenagem de aproximadamente 636.000 km², sendo o terceiro maior rio inteiramente brasileiro. Seu alto curso, localizado majoritariamente no estado de Minas Gerais, é dominado pelo bioma Cerrado, que possui papel hidrológico fundamental como zona de recarga dos principais aquíferos da bacia. O médio e baixo cursos atravessam regiões semiáridas da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, onde a água subterrânea muitas vezes representa o único recurso hídrico perene disponível.

Do ponto de vista hidrogeológico, a bacia abriga sistemas aquíferos de diferentes naturezas. O Aquífero Urucuia, de natureza granular e localizado principalmente no oeste da Bahia, é responsável pela manutenção do fluxo de base do São Francisco no médio curso. O Sistema Aquífero Bambuí, de natureza carbonática (cárstica em sua porção mais favorável), ocorre em grande parte da região central de Minas Gerais e na Bahia, apresentando recarga relativamente alta (em torno de 18% da precipitação) em sua porção carbonática (GETIRANA et al., 2026; CAMACHO, 2025).

O Embasamento Cristalino, predominante na região semiárida, apresenta aquíferos fissurais de baixa produtividade e elevada vulnerabilidade às secas. A Formação Serra Geral e a Formação Botucatu (Sistema Aquífero Guarani) afloram em porções do sul da bacia, nas fronteiras com as bacias do Paraná e Atlântico Sudeste (CAMACHO, 2025).

6.2 O Sinclinal Moeda E O Quadrilátero Aquífero-Ferrífero

O Sinclinal Moeda é uma estrutura geológica localizada na porção oeste do Quadrilátero Aquífero-Ferrífero (QAF), no estado de Minas Gerais, integrando a sub-bacia do Rio das Velhas, afluente do Rio São Francisco. A região é caracterizada por intensa atividade minerária voltada à extração de minério de ferro e ouro, desenvolvida ao longo de décadas por grandes empresas. As operações de mineração nessa região, tanto em minas a céu aberto quanto subterrâneas, requerem o rebaixamento contínuo do lençol freático (*dewatering*), transformando as cavas em verdadeiros drenos hidráulicos que capturam o fluxo subterrâneo regional. A estrutura possui orientação predominante norte-sul e é dividida em flanco leste (flanco oriental) e flanco oeste (flanco ocidental), os quais apresentam características hidrogeológicas distintas, embora compartilhem os mesmos sistemas aquíferos principais.

O flanco leste abrange aproximadamente 305 km², estendendo-se entre os municípios de Belo Horizonte, Nova Lima, Rio Acima, Itabirito e Ouro Preto, concentrando a maior parte da atividade minerária ativa, com 11 a 13 minas de extração de minério de ferro em operação no período 2000-2019 (MAGALHÃES et al., 2022; PACHECO NETO et al., 2026). O flanco oeste abrange aproximadamente 470 km² e inclui os municípios de Brumadinho, Belo Vale, Congonhas, Itabirito, Jeceaba, Moeda, Nova Lima e Ouro Preto, contando com 11 empreendimentos minerários, dois condomínios residenciais e uma indústria (ANDRADE et al., 2025).

A região é caracterizada por clima tropical semiúmido (Köppen Cwb), com estação chuvosa de outubro a março concentrando cerca de 88% da precipitação anual e estação seca de abril a setembro. A precipitação média anual varia entre 1.475 mm no flanco oeste (ANDRADE et al., 2025) e 1.576 mm no flanco leste (MAGALHÃES et al., 2022; PACHECO NETO et al., 2026).

6.3 Sistemas aquíferos do Sinclinal Moeda

Os sistemas aquíferos do Sinclinal Moeda estão diretamente associados às unidades litoestratigráficas do Supergrupo Minas (Paleoproterozoico). Tanto no flanco leste quanto no flanco oeste, os mesmos aquíferos principais ocorrem, embora com variações de espessura e parâmetros hidrodinâmicos. Magalhães et al. (2022) e Pacheco Neto et al. (2026) descrevem quatro unidades hidrogeológicas principais no flanco leste: (i) Aquífero Cauê, (ii) Aquífero Gandarela, (iii) Aquífero Moeda e (iv) Aquitardo Batatal. Andrade et al. (2025) identificam cinco unidades aquíferas no flanco oeste: (i) Aquífero Cauê, (ii) Aquífero Gandarela, (iii) Aquífero Moeda, (iv) Aquífero Itacolomi e (v) Aquífero das Coberturas, além de cinco unidades não aquíferas.

O Aquífero Cauê é a unidade mais produtiva e hidrológicamente mais importante em toda a extensão do Sinclinal. É composto por formações ferríferas bandadas (itabiritos e hematitas) da

Formação Cauê, com porosidade granular na superfície e fissural em profundidade, apresentando caráter heterogêneo e anisotrópico. No flanco leste, a condutividade hidráulica média calculada foi de $9,45 \times 10^{-7}$ m/s (MAGALHÃES et al., 2022), com transmissividade variando de 0,5 a 160 m²/dia (média de 69 m²/dia) (PACHECO NETO et al., 2026). No flanco oeste, a mediana da condutividade hidráulica foi de 1×10^{-8} m/s, com amplitude entre 3×10^{-10} m/s e 2×10^{-2} m/s, refletindo a elevada heterogeneidade da unidade (ANDRADE et al., 2025). A espessura da Formação Cauê varia de 200 m a 1.400 m no flanco leste (MAGALHÃES et al., 2022) e de 100 m a 1.000 m no flanco oeste (ANDRADE et al., 2025). A Base Flow Index (BFI) do aquífero Cauê no flanco leste foi estimada em 69%, indicando que aproximadamente dois terços do escoamento nos rios da região é sustentado pelo aquífero (MAGALHÃES et al., 2022).

O Aquitardo Batatal, composto por filitos carbonosos, sericíticos e ferruginosos, possui baixa permeabilidade (condutividade hidráulica de $9,20 \times 10^{-8}$ m/s segundo Mourão (2007 apud MAGALHÃES et al., 2022)) e atua como camada confinante basal das unidades sobrepostas. Apesar de sua baixa espessura (geralmente inferior a 30 m e no máximo 250 m) e ocorrência descontínua, o Aquitardo Batatal desempenha papel relevante na dinâmica do sistema, pois sua descontinuidade permite a conexão hidráulica entre os aquíferos Moeda e Cauê (ANDRADE et al., 2025). O Aquífero Gandarela, de natureza dolomítica e com ocorrência localmente cárstica, apresenta condutividade hidráulica média de $7,38 \times 10^{-8}$ m/s (flanco leste) e mediana de 8×10^{-8} m/s (flanco oeste). O Aquífero Moeda, composto por quartzitos da Formação Moeda, ocorre na borda oeste do Sinclinal e apresenta comportamento predominantemente fissural.

Apenas na porção oriental do Sinclinal Moeda as taxas de extração de água subterrânea atingem 150% da recarga estimada da área, o que representa 0,041 km³ por ano sobre uma área de 305 km². Esse desequilíbrio resulta na redução anual do armazenamento do aquífero em 134,4 mm de coluna de água, impacto suficientemente intenso para ser detectado pelos satélites gravimétricos GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*). Os impactos hidrológicos dessa mineração são observáveis na bacia do Rio das Velhas e podem se estender às bacias do Atlântico Sudeste e Atlântico Leste.

6.4 Outros sistemas hídricos de Minas Gerais

Além do Rio São Francisco e do Sinclinal Moeda, o estado de Minas Gerais integra parcialmente outras bacias hidrográficas relevantes sob a perspectiva das perdas hídricas: a Bacia do Rio Paraná, onde ocorrem os aquíferos Bauru-Caiuá e a zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (Formação Botucatu), e as bacias do Atlântico Sudeste e Atlântico Leste, que drenam a vertente atlântica do estado. O estado posiciona-se, portanto, como um nó hidrológico entre sistemas de grande relevância nacional, tornando as tendências de perda de armazenamento observadas em seu território de interesse estratégico para o planejamento hídrico nacional.

7 Bases Científicas e Metodologia dos Estudos

7.1 Estudos de escala nacional e regional

O trabalho de Getirana et al. (2026), publicado na revista Science Advances em junho de 2026, realizou a primeira reconstrução nacional e observacional das variações do armazenamento de água subterrânea (GWS) no Brasil entre 2002 e 2023. A tese de doutorado de Camacho (2025), que serviu de base metodológica para aquele artigo, desenvolveu um modelo de inteligência artificial (IA) baseado em ensemble de algoritmos de aprendizado de máquina (XGBoost, LightGBM e CatBoost), treinado com 34.145 observações de 398 poços da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) do Serviço Geológico do Brasil (SGB), cobrindo o período de 2010 a 2023. As variáveis preditoras incluíram 33 entradas derivadas de dados dos satélites GRACE/GRACE-FO, MODIS e GPM, além de dados hidrogeológicos e socioeconômicos.

Após o treinamento, o modelo foi aplicado a 87.367 pontos de grade com resolução de 0,1°, gerando quase 20 milhões de estimativas mensais de GWS. A análise de tendências utilizou clusterização por Support Vector Machine (SVM) e os testes estatísticos não paramétricos de Mann-Kendall e Sen.

A recarga das águas subterrâneas foi estimada pelo Método da Flutuação do Nível d'Água (*Water Table Fluctuation* – WTF), aplicado às simulações mensais do modelo de IA. A abordagem utilizada baseia-se no método de *bins* médios, conforme Heppner e Nimmo (2005), com intervalos definidos em 200 compartimentos. A incerteza dos resultados foi estimada pelo Método de Monte Carlo com 10.000 simulações por pixel, resultando em uma incerteza final de aproximadamente ± 16 mm por ano para a média nacional (GETIRANA et al., 2026; CAMACHO, 2025).

A análise de tendências de longo prazo foi realizada por meio da classificação por Support Vector Machine (SVM) com kernel de função de base radial, que delimitou sete regiões hidroclimaticamente coerentes com comportamentos distintos de armazenamento subterrâneo. Complementarmente, foram aplicados os testes estatísticos não paramétricos de Mann-Kendall e de Sen para quantificar as tendências temporais nas séries de GWS e TWS para cada grande bacia hidrográfica (CAMACHO, 2025). A correlação entre a tendência do armazenamento e diferentes variáveis explicativas (precipitação, evapotranspiração, densidade de poços SIAGAS, áreas de irrigação por pivô central, supressão da cobertura vegetal original e presença de licenças de lavra para mineração) foi avaliada pelo coeficiente de Pearson.

O artigo de Uchôa et al. (2024), publicado na Nature Communications, analisou dados de nível d'água de 17.972 poços selecionados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do SGB. A seleção aplicou três critérios restritivos: distância máxima de 1 km do rio mais próximo, profundidade máxima de 100 m e presença em aquífero livre. Para cada poço, a elevação do nível estático foi comparada à elevação da superfície d'água do rio mais próximo, estimada a partir de dados topográficos NASADEM (30 m) corrigidos por funções de altura de margens plenas desenvolvidas com base em 488 estações fluviométricas brasileiras. Um rio foi classificado como perdedor quando a superfície d'água do canal estava acima do nível piezométrico dos poços adjacentes.

7.2 Estudos sobre impactos da irrigação nos recursos hídricos

Lucas et al. (2021), em trabalho publicado na revista Water, analisou tendências de longo prazo em vazão e fluxo de base do Rio São Francisco entre 1980 e 2015 em 47 estações fluviométricas, empregando os testes de Mann-Kendall e Sen para detecção de tendências. A atribuição causal das reduções de vazão foi feita por comparação espacial entre tendências de fluxo de base, evapotranspiração (GLEAM) e armazenamento terrestre (GRACE), e a localização das lavouras irrigadas, descartando a precipitação como causa principal pela ausência de tendências pluviométricas significativas nas mesmas regiões.

Rodrigues et al. (2024), em artigo publicado no Journal of Environmental Management, separou os efeitos da variabilidade climática e do bombeamento de águas subterrâneas sobre as vazões em quatro bacias do Sistema Aquífero Urucua por meio de modelagem por inteligência artificial e assinaturas hidrológicas. O método reconstituiu séries temporais naturais de vazão, permitindo comparar as condições observadas (com bombeamento) com as condições naturais estimadas.

Guimarães e Landau (2024), da Embrapa, realizaram o mapeamento nacional das áreas irrigadas por pivôs centrais a partir de imagens dos satélites Sentinel-2 e do Google Earth Engine, produzindo o levantamento mais atualizado disponível sobre a expansão da irrigação no Brasil.

7.3 Estudos locais no Sinclinal Moeda

Magalhães et al. (2022), publicado no *Brazilian Journal of Geology*, gerou o modelo hidrogeológico conceitual de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda com base em dados de monitoramento de 2000 a 2019. O estudo incluiu a definição de unidades aquíferas e condições de contorno, o cálculo de parâmetros hidrodinâmicos (15 testes de bombeamento), o balanço hídrico, a reserva renovável e a análise do fluxo subterrâneo por meio de mapas potenciométricos e superfícies piezométricas tridimensionais geradas no software Leapfrog Geo. Os dados de outorga de extração de água subterrânea foram obtidos do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

Andrade et al. (2025), publicado na *Revista Brasileira de Geografia Física*, realizou a análise hidrogeológica regional do flanco oeste do Sinclinal Moeda para o período 1999-2019, com base em dados de 82 poços e piezômetros, 75 testes de bombeamento, 17 vertedouros e 8 estações pluviométricas. O fluxo subterrâneo foi caracterizado a partir de mapas potenciométricos construídos com dados de 2019, e as reservas renováveis foram estimadas por balanço hídrico com separação de hidrogramas pelo método de Smakhtin (1997). O trabalho complementar de Andrade et al. (2023), apresentado no XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, sistematizou os dados de recarga dos aquíferos do flanco oeste com base nos mesmos 17 vertedouros distribuídos na área.

Pacheco Neto et al. (2026), publicado no *Hydrogeology Journal*, desenvolveu o primeiro modelo numérico de fluxo subterrâneo de escala regional para o flanco leste do Sinclinal Moeda, utilizando o software FEFLOW (elementos finitos). O modelo foi calibrado em regime permanente (1999) e transiente (1999-2019) e empregou para a projeção futura o horizonte de planejamento 2019-2039, alinhado ao Plano Estadual de Saneamento Básico de Minas Gerais. A validação utilizou 133 pontos de observação e comparou as vazões simuladas com dados fluviométricos de 20 estações de monitoramento de drenagens.

8 Perdas Hídricas Causadas pela Irrigação Agrícola em Minas Gerais

8.1 Dimensão da irrigação em Minas Gerais e no Brasil

A irrigação é o maior uso da água no Brasil e no mundo, respondendo por 46% das retiradas totais nos corpos hídricos e por 67% do consumo efetivo (água que não retorna diretamente ao sistema hídrico) (ANA, 2021). No contexto mineiro, essa pressão é amplificada pela posição estratégica do estado como um dos maiores polos agrícolas irrigados do país. Segundo levantamento da Embrapa (GUIMARÃES; LANDAU, 2024), **o Brasil contava em 2024 com 2,2 milhões de hectares irrigados por 33. 846 pivôs centrais, um acréscimo de 140. 842 ha e 3. 807 novos equipamentos em apenas dois anos. Mais de 70% dos equipamentos de irrigação estão localizados no bioma Cerrado, que cobre grande parte de Minas Gerais, Bahia, Goiás e Mato Grosso.**

Minas Gerais manteve-se historicamente como o maior polo de irrigação por pivôs centrais do Brasil até 2024, quando foi superado pelo Extremo Oeste Baiano. Os municípios mineiros de Paracatu e Unaí, ambos no Noroeste do estado, figuram como o segundo e terceiro maiores municípios irrigantes do país em área irrigada por pivôs centrais (GUIMARÃES; LANDAU, 2024), com 88. 889 ha e 81. 246 ha respectivamente.

Em 2019, Minas Gerais contabilizava 478. 588 ha de área irrigada e 8. 115 pivôs centrais, sendo que somente os municípios da Região de Gestão Integrada (RGIInt) de Patos de Minas concentravam 272. 546 ha e 4. 375 pivôs (ANA, 2021; SOARES, 2025). A região do Noroeste mineiro abriga dois dos três municípios com maior demanda hídrica por irrigação em todo o país (ANA, 2021).

8.2 Impactos da irrigação sobre as águas subterrâneas na Bacia do São Francisco

A ligação entre a expansão da irrigação agrícola com captação de águas subterrâneas e a redução do fluxo de base do Rio São Francisco foi demonstrada de forma robusta por Lucas et al. (2021), em estudo publicado na revista *Water*. Os autores analisaram tendências de longo prazo em vazão e fluxo de base do Rio São Francisco entre 1980 e 2015, encontrando que mais de 86% da redução observada na vazão total do rio pode ser atribuída à diminuição do fluxo de base, com concordância espacial entre as áreas de redução do fluxo de base, aumento da evapotranspiração e expansão das lavouras irrigadas no médio São Francisco. A ausência de tendências significativas na precipitação nas mesmas regiões descarta a variabilidade pluviométrica como causa principal, indicando que as retiradas de água superficiais e subterrâneas para irrigação são os prováveis vetores da escassez hídrica observada (LUCAS et al., 2021).

Um papel central nesse processo é desempenhado pelo Sistema Aquífero Urucuia, que sustenta o Rio São Francisco durante os períodos de estiagem. Rodrigues et al. (2024), em artigo publicado no *Journal of Environmental Management*, empregaram modelos de inteligência artificial e assinaturas hidrológicas para separar os efeitos da variabilidade climática e do bombeamento subterrâneo sobre as vazões em quatro bacias hidrográficas inseridas no Urucuia. Os resultados demonstraram que o bombeamento para irrigação é o principal fator responsável pela secura observada no sistema aquífero, sendo que as mudanças na duração máxima dos períodos de baixa vazão variaram de 191,7% a 1.315,7%, e os déficits de baixa vazão atingiram até 7.150% em relação às condições naturais estimadas. Esses impactos ocorreram mesmo em bacias com cobertura vegetal preservada, evidenciando que **o uso subterrâneo, e não o desmatamento, é o fator determinante** (RODRIGUES et al., 2024).

O declínio da contribuição do Aquífero Urucuia ao Rio São Francisco foi documentado quantitativamente: em 1980, o aquífero descarregava em média 792 m³/s para o Rio São Francisco; **essa contribuição caiu continuamente para apenas 390 m³/s em 2015, uma redução de mais de 50% em 35 anos** (GONÇALVES et al., 2020 apud LUCAS et al., 2021). Paralelamente, o armazenamento terrestre no Urucuia apresentou tendência de declínio de $-6,5 \pm 2,6$ mm/ano (equivalente a 9,75 km³) no período 2003-2014 (GONÇALVES et al., 2020), valor corroborado pelas análises de Camacho (2025) e Getirana et al. (2026), que estimam perda acumulada de ~31 km³ entre 2002 e 2023.

8.3 Irrigação e conflitos hídricos no Noroeste de Minas Gerais

A Bacia do Rio Paracatu, inserida na sub-bacia do São Francisco e localizada no Noroeste de Minas Gerais, é um dos epicentros nacionais de conflitos pelo uso da água associados à irrigação. A irrigação é o uso preponderante da bacia, respondendo por 86,6% de toda a demanda hídrica, sendo o pivô central o sistema predominante (ATLAS DAS ÁGUAS DE MINAS, 2007). A sub-bacia do Ribeirão Entre Ribeiros, que concentra a maior densidade de pivôs da região nos municípios de Paracatu e Unaí, registrou episódios em que a vazão em sua foz chegou a zero nos meses secos de 2001 e 2002, situação classificada pela ANA (2005) como "preocupante" no balanço nacional demanda-disponibilidade. Desde 2005, a bacia acumulou 58 Declarações de Áreas de Conflito (DAC) emitidas pelo IGAM, das quais 55 envolviam conflitos entre irrigantes e 2 conflitos entre irrigação e abastecimento público (IGAM, 2020).

O IGAM identificou que oito áreas do Norte de Minas atingiram 100% do limite outorgável, impedindo a emissão de novas outorgas para captação de água subterrânea (AGÊNCIA MINAS, 2024). Essa situação reflete **a pressão combinada da expansão agrícola e do crescimento industrial sobre aquíferos** em regiões onde as águas superficiais já são insuficientes para atender

a demanda. A maior concentração de Declarações de Áreas de Conflito por escassez quantitativa em Minas Gerais está justamente nas mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e no Noroeste mineiro (IGAM, 2020), abrangendo as bacias do Paranaíba e do São Francisco.

No contexto institucional, a Deliberação Normativa CERH/MG nº 76/2022 modificou os parâmetros de outorga de água subterrânea em Minas Gerais, estabelecendo que **poços tubulares com extração de até 14 m³/dia podem ser regularizados como uso insignificante em todo o estado**. Embora essa medida vise facilitar a regularização de pequenos usos rurais, ela também reflete a amplitude do uso difuso e frequentemente não cadastrado de águas subterrâneas para irrigação em Minas Gerais, dificultando a quantificação precisa das retiradas totais e o planejamento integrado dos recursos hídricos.

8.4 Impactos da irrigação na Bacia do Rio Verde Grande

A **Bacia do Rio Verde Grande**, afluente do São Francisco pelo lado esquerdo e integralmente localizada no Norte de Minas Gerais, constitui outro caso emblemático de conflito hídrico associado à irrigação. **A irrigação representa 90% do consumo de água da bacia (UCHÔA et al., 2024), e a escassez hídrica é frequente na região**, tendo ocorrido período de racionamento de abastecimento urbano no município de Montes Claros, maior cidade da bacia, com aproximadamente 40% da população regional, entre 2015 e 2020. O IGAM declarou situação crítica de escassez hídrica superficial na porção do Reservatório de Juramento em 2017 (Portaria nº 25/IGAM) e estendeu a declaração em 2019 (Portaria nº 57/IGAM), evidenciando o caráter persistente e agravado do problema (EMBRAPA, 2024).

A Bacia do Verde Grande foi identificada por Uchôa et al. (2024) como a área onde a proporção de rios potencialmente perdedores é mais alta dentre as unidades de gerenciamento avaliadas, com 74% dos rios classificados nessa condição, indicando que o rebaixamento do lençol freático pela superexploração para irrigação inverteu o gradiente hidráulico natural em grande parte do sistema fluvial da bacia. A exploração de aquíferos cársticos (Grupo Bambuí) por baterias de poços para megaempreendimentos agropecuários também foi documentada na bacia, tendo sido investigado um caso no município de São João da Ponte com mais de 1. 200 poços de bombeamento registrados no SIAGAS na área do Alto Verde Grande (IGAM, 2024).

A Fig. 4 a seguir, cópia da Fig. 2 do trabalho de Uchôa et al. (2026), mostra que, entre os rios com pelo menos um poço próximo a cada 100 km de extensão, 56,4% são rios potencialmente perdedores (ou seja, mais da metade dos rios brasileiros avaliados apresentam potencial para perda de água para os aquíferos subjacentes). No entanto, essa fração pode ser ainda maior, considerando que o trabalho empregou diversas abordagens conservadoras. A figura destaca as bacias do Rio São Francisco e do Rio Verde Grande, que apresentam as perdas bastante significativas descritas acima.

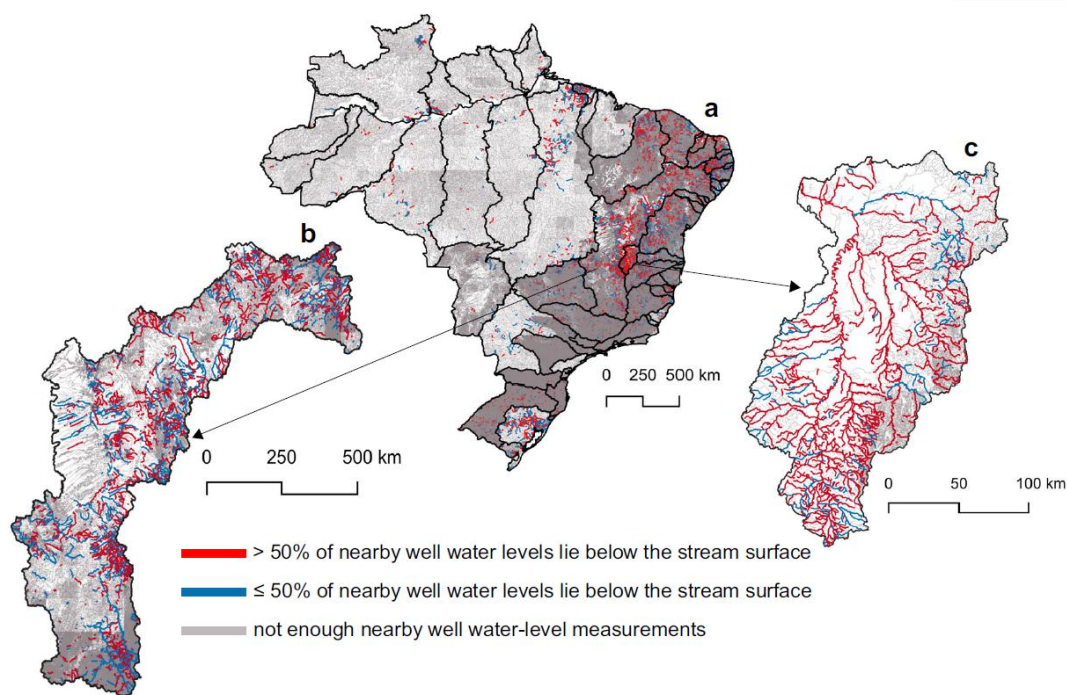
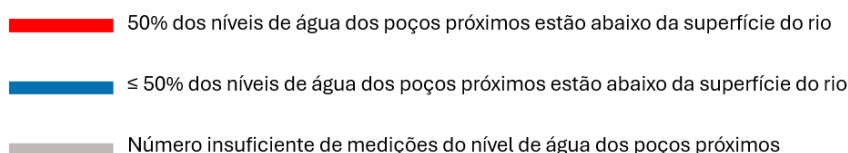


Fig. 4 - Prevalência de rios com potencial de perda e ganho de água no Brasil (a). As linhas vermelhas representam trechos de rios onde a maioria (>50%) dos poços próximos apresenta níveis de água abaixo da superfície do curso d'água. As linhas azuis representam trechos de rios onde metade ou menos da metade (≤50%) dos poços próximos apresentam níveis de água abaixo da superfície do curso d'água. A maioria dos rios com potencial de perda de água está localizada em áreas áridas ou em regiões com forte atividade agrícola, conforme indicado nos mapas de detalhes: Unidades de Gestão de Recursos Hídricos do São Francisco (b), Unidades de Gestão de Recursos Hídricos do Verde Grande (c). Apenas rios com pelo menos um poço a cada 100 km de extensão são classificados como rios com potencial de perda e ganho de água. **Fonte:** Uchôa et al. (2024), Fig. 2.

Legenda (tradução livre):



8.5 Efeitos da irrigação sobre os aquíferos do Cerrado mineiro

O bioma Cerrado, que cobre aproximadamente 50% do território mineiro, abriga as principais zonas de recarga dos aquíferos estratégicos do estado, incluindo os Sistemas Aquífero Bambuí, Urucua, Guarani (afloramento), Bauru-Caiuá e Parecis.

A expansão da agricultura irrigada sobre áreas de Cerrado impacta os recursos hídricos subterrâneos por duas vias principais: **a extração direta via bombeamento de poços e a redução da recarga decorrente da substituição da vegetação nativa**. Oliveira et al. (2015, 2017), citados por Getirana et al. (2026), demonstraram que **maior densidade de vegetação nativa do Cerrado está associada a maior recarga subterrânea, e que sua remoção para agricultura reduz a infiltração**.

A correlação entre presença de pivôs de irrigação e tendência negativa de armazenamento subterrâneo foi avaliada por Camacho (2025) para todo o Brasil: utilizando dados do mapa de pivôs da ANA (2024), o coeficiente de correlação de Pearson entre a densidade de pivôs e a tendência negativa de GWS nas áreas com declínio de armazenamento foi de 0,33, classificado

como moderado, sendo um dos indicadores mais consistentes dentre os testados. O mapa de tendência do GWS derivado das simulações de Camacho (2025) e Getirana et al. (2026) mostra que **as áreas de maior concentração de pivôs centrais em Minas Gerais (Noroeste, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba) coincidem espacialmente com as regiões de maior perda de armazenamento subterrâneo no estado.**

As projeções para o futuro são igualmente preocupantes. Uchôa et al. (2024) estimam que as áreas irrigadas no Brasil devem crescer mais de 50% nos próximos 20 anos, com expansão concentrada justamente nas regiões já deficitárias em armazenamento subterrâneo. Hirata e Conicelli (2012, apud GETIRANA et al., 2026) projetam que a recarga subterrânea no semiárido brasileiro (que inclui porções do norte de Minas Gerais) pode reduzir-se em até 70% em cenários de mudanças climáticas, agravando ainda mais o desequilíbrio entre demanda agrícola e disponibilidade hídrica. Guimarães e Landau (2024) alertam que **o rebaixamento do nível dos aquíferos pela irrigação traz grandes desafios para a produção de alimentos no futuro, com menor oferta de água a longo prazo, maiores custos de bombeamento, redução das vazões superficiais e tendência de salinização das águas subterrâneas.**

Tabela 1 – Síntese dos impactos da irrigação agrícola sobre os recursos hídricos subterrâneos em Minas Gerais e na Bacia do São Francisco.

Região / Sistema	Indicador / Impacto	Valor / Status	Fonte
Bacia do São Francisco (médio)	Redução da contribuição do Urucuia ao rio	792 m³/s (1980) → 390 m³/s (2015)	Gonçalves et al. (2020) apud Lucas et al. (2021)
Bacia do São Francisco	Fração da redução de vazão atribuída ao declínio do fluxo de base	> 86%	Lucas et al. (2021)
Aquífero Urucuia (total)	Declínio armazenamento	–6,5 mm/ano; ~31 km³ acumulados (2002–2023)	Gonçalves et al. (2020); Camacho (2025)
Bacias no Urucuia (irrigação)	Aumento da duração de baixa vazão	+191,7% a +1.315,7%	Rodrigues et al. (2024)
Bacias no Urucuia (irrigação)	Déficit de baixa vazão	Até 7.150%	Rodrigues et al. (2024)
Minas Gerais (geral)	Área irrigada por pivôs (2019)	478.588 ha / 8.115 pivôs	ANA (2021)
Paracatu (MG)	Maior área irrigada por pivôs (2024)	88.889 ha (2º Brasil)	Guimarães; Landau (2024)
Unaí (MG)	Área irrigada por pivôs (2024)	81.246 ha (3º Brasil)	Guimarães; Landau (2024)
B. Rio Paracatu	Participação da irrigação no consumo hídrico total	86,6%	Atlas das Águas de Minas (2007)
B. Rio Paracatu	DACs emitidas (até 2015)	58 (55 entre irrigantes)	IGAM (2020)
B. Rio Verde Grande	Participação da irrigação no consumo hídrico total	90%	Uchôa et al. (2024)
B. Rio Verde Grande	Rios potencialmente perdedores	74%	Uchôa et al. (2024)
Norte de MG (IGAM)	Áreas com limite outorgável 100% atingido	8 áreas (sem novas outorgas)	IGAM / Agência Minas (2024)
Tendência GWS × pivôs	Correlação (Pearson)	0,33 (moderada)	Camacho (2025)

8.6 Desafios da gestão integrada

A gestão da irrigação em Minas Gerais enfrenta desafios estruturais que comprometem o controle adequado das retiradas de água subterrânea. A correlação fraca a moderada entre localização de pivôs e declínio do armazenamento subterrâneo (Pearson 0,33), calculada por Camacho (2025), reflete em parte a dificuldade de capturar os impactos acumulados de poços difusos e não cadastrados, bem como os efeitos temporalmente defasados do bombeamento sobre os aquíferos. Estima-se que **o número de poços efetivamente operando sem outorga seja substancialmente maior do que o número de concessões registradas no IGAM, pois as outorgas concedidas representam apenas o mínimo bombeado e não cobrem o universo de usuários rurais que operam por uso insignificante ou de forma irregular.**

O paradoxo hidrológico da irrigação no Cerrado mineiro é que **a expansão agrícola ocorre justamente sobre as zonas de recarga dos aquíferos mais estratégicos do estado. Isso cria um ciclo de retroalimentação negativa**, no qual a irrigação depleciona os aquíferos, que por sua vez reduzem o fluxo de base dos rios, levando os agricultores a perfurar mais poços para compensar a queda da disponibilidade de água superficial, aprofundando ainda mais a depleção subterrânea.

A situação é agravada pelo desmatamento do Cerrado, que reduz simultaneamente a recarga natural dos aquíferos (OLIVEIRA et al., 2015, 2017 apud GETIRANA et al., 2026; CAMACHO, 2025). A gestão eficaz desses recursos exige a integração da política de outorgas de água subterrânea com o licenciamento ambiental, o monitoramento em tempo real via sensoriamento remoto e telemetria, e a incorporação de critérios de sustentabilidade do aquífero – incluindo a recarga efetiva e o fluxo de base mínimo para os rios – como limites inegociáveis para a concessão de novas outorgas.

9 Perdas Hídricas no Sinclinal Moeda

9.1 Recarga dos aquíferos

A recarga dos aquíferos no Sinclinal Moeda foi estimada de forma consistente nos estudos locais por métodos de separação de hidrogramas. No flanco leste, Magalhães et al. (2022) calcularam uma taxa de recarga de 38,67% da precipitação para o Aquífero Cauê, valor superior à média nacional calculada por Getirana et al. (2026) e Camacho (2025) para aquíferos granulares brasileiros (12,5%), o que reflete a alta permeabilidade das formações ferríferas alteradas. O Aquífero Gandarela apresentou taxa de recarga de 16,52% no flanco leste, enquanto os demais aquíferos mostraram valores inferiores.

No flanco oeste, Andrade et al. (2025) e Andrade et al. (2023) obtiveram os seguintes valores médios de recarga (com intervalos de variação refletindo a heterogeneidade regional): Aquífero Cauê com média de 26% (mínimo de 9% e máximo de 49% da precipitação), Aquífero Gandarela com média de 28% (mínimo de 18% e máximo de 45%), Aquífero Moeda com média de 18% (mínimo de 3% e máximo de 46%) e Aquífero Itacolomi com média de 15% (mínimo de 6% e máximo de 44%). Mourão (2007, apud ANDRADE et al., 2025) havia estimado taxas de recarga entre 28% e 38% para o Cauê, e valores inferiores a 28% para as demais unidades. A discrepância entre os valores de Magalhães et al. (2022) para o flanco leste (38,67%) e os de Andrade et al. (2025) para o flanco oeste (26% em média para o Cauê) pode ser atribuída às diferenças metodológicas e às variações estruturais e litológicas entre os dois flancos.

A reserva renovável média anual do Aquífero Cauê no flanco leste foi estimada em aproximadamente 27 milhões de m³/ano, enquanto a reserva renovável de toda a área do flanco leste (305 km²) foi de aproximadamente 93 milhões de m³/ano (MAGALHÃES et al., 2022). O

modelo numérico de Pacheco Neto et al. (2026) utilizou taxa de recarga de 30% para o Aquífero Cauê (28% no Setor Central 2), 18% para o Gandarela (20% no Setor Norte), 20% para o Aquífero Moeda e 4% para o Aquitardo Batatal, com taxas de 60% sobre as cavas das minas (50% no Setor Central 2), por serem áreas com impermeabilização parcial e drenagem forçada.

Tabela 2 – Taxas de recarga subterrânea nos aquíferos do Sinclinal Moeda.

Aquífero	Taxa de recarga – Flanco Leste (%)	Taxa de recarga – Flanco Oeste (%)	Fonte
Cauê	38,67% (Magalhães) / 30–39% (modelo numérico)	9–49% (média: 26%)	Magalhães et al. (2022); Pacheco Neto et al. (2026); Andrade et al. (2025)
Gandarela	16,52%	18–45% (média: 28%)	Magalhães et al. (2022); Andrade et al. (2025)
Moeda	Não calculado (sem dados fluviométricos)	3–46% (média: 18%)	Andrade et al. (2025)
Itacolomi	Não presente / sem dados	6–44% (média: 15%)	Andrade et al. (2025)
Batatal (aquitardo)	5,85%	~12 – 14% (estimado)	Magalhães et al. (2022); Andrade et al. (2025)
Coberturas / canga	> 30% (Mourão 2007)	Alta (facilitador)	Pacheco Neto et al. (2026)

9.2 Superexploração e déficit hídrico: flanco leste

No flanco leste do Sinclinal Moeda, a mineração de minério de ferro por 11 a 13 minas ativas requer o rebaixamento contínuo do lençol freático para manter as cavas operacionais. O volume anual bombeado cresceu de 14 milhões de m³/ano em 1999 para 52 milhões de m³/ano em 2019, com uma média de 41 milhões de m³/ano ao longo do período (PACHECO NETO et al., 2026). Isso equivale a uma vazão média de extração de aproximadamente 4. 680 m³/h, enquanto a reserva renovável do Aquífero Cauê garante apenas cerca de 3. 082 m³/h, ou seja, desde 2004 o volume de outorgas de extração supera sistematicamente a reserva renovável do Aquífero Cauê (MAGALHÃES et al., 2022).

A proporção entre extração e recarga foi quantificada com precisão por Magalhães et al. (2022): o volume médio bombeado (41 milhões de m³/ano) equivale a aproximadamente 150% da reserva renovável do Aquífero Cauê (27 milhões de m³/ano) na área de 305 km². Getirana et al. (2026) e Camacho (2025) referenciam esse resultado ao reportar que na porção oriental do Sinclinal Moeda as taxas de extração atingem 150% da recarga, representando 0,041 km³/ano sobre 305 km², com declínio anual de armazenamento de 134,4 mm de coluna de água. Esse impacto tem magnitude suficiente para ser detectado pelos satélites GRACE.

O excesso de extração em relação à recarga – estimado em 14 milhões de m³/ano como mínimo (pois **apenas poços com outorgas foram contabilizados**) – é suprido a partir de três fontes: depleção da reserva permanente do aquífero, redução do escoamento superficial e captura de fluxo de unidades adjacentes (Aquíferos Gandarela e Moeda) que passam a contribuir hidráulicamente para o Cauê, em vez de receberem dele (MAGALHÃES et al., 2022).

9.3 Rebaixamento do nível d'água: flanco leste

O modelo conceitual de Magalhães et al. (2022) e o modelo numérico de Pacheco Neto et al. (2026) revelaram o padrão espacial do rebaixamento do nível d'água no flanco leste. O mapa potenciométrico de 2019 mostra que os menores níveis piezométricos concentram-se no setor

Central 1, onde ocorreu a maior reversão de fluxo. O fluxo regional tende para o sul, em direção ao Rio Itabirito (nível de base local), com gradiente hidráulico de 8,75 m/km, e para leste, em direção ao Rio das Velhas (nível de base regional), com gradiente médio de 80 m/km. O Aquífero Cauê atua como divisor d'água em condições naturais, mas essa função é suprimida nos setores com maior bombeamento.

A calibração transiente do modelo numérico (1999-2019) de Pacheco Neto et al. (2026) indicou um rebaixamento médio de 10,4 m no Aquífero Cauê e de 2,2 m nas demais unidades. Por setores, o Setor Central 2 sofreu o maior impacto, com declínio médio de 11,6 m (32,9 m segundo os pontos de observação concentrados próximos às cavas) e redução de fluxo de base de 21,6%. O Setor Norte apresentou declínio médio de 5,1 m (15,4 m pelos pontos de observação) e redução de fluxo de base de 13,7%. O Setor Central 1 registrou 5,5 m de rebaixamento médio e 9,4% de redução de fluxo de base. O Setor Sul, com menor atividade minerária, apresentou o menor impacto, com 1,0 m de rebaixamento médio e 6,2% de redução de fluxo de base. No período de monitoramento, um piezômetro no Setor Central 1 registrou rebaixamento de aproximadamente 80 m entre 2000 e 2019 (MAGALHÃES et al., 2022). A redução total do fluxo de base na área modelada foi de 13,6% no período 1999-2019 (PACHECO NETO et al., 2026).

Um resultado particularmente relevante do modelo numérico de Pacheco Neto et al. (2026) é a reversão progressiva do fluxo entre os aquíferos. Em condições iniciais (1999), o Aquífero Cauê funcionava como um divisor d'água, fornecendo água para os Aquíferos Gandarela e Batatal, os quais, por sua vez, alimentavam o Aquífero Moeda. Após duas décadas de bombeamento intenso, o Aquífero Gandarela, que originalmente recebia água do Cauê, passou a fornecê-la para o Cauê. Simultaneamente, as entradas provenientes do Batatal e do Moeda para o Cauê foram progressivamente reduzidas (PACHECO NETO et al., 2026).

Tabela 3 – Rebaixamento do nível d'água e redução do fluxo de base por setor no flanco leste do Sinclinal Moeda (1999–2019), segundo Pacheco Neto et al. (2026).

Setor	Rebaixamento médio (isosuperfície, m)	Rebaixamento médio (pontos de obs., m)	Redução de fluxo de base (%)	Observação
Central 2	11,6	32,9	21,6%	Maior impacto; 3 minas ativas
Norte	5,1	15,4	13,7%	3 minas próximas ao Córrego Fechos
Central 1	5,5	5,9	9,4%	Maior reversão de fluxo E-W/N-S
Sul	1,0	1,3 (estimado)	6,2%	Sem minas com outorga
Total (média)	10,4 (Cauê) / 2,2 (outras unidades)	–	13,6%	Período 1999–2019

A Fig. 5 a seguir apresenta o gráfico da reserva renovável calculada para o Aquífero Cauê e para toda a área estuda (Flanco **Leste** do Sinclinal Moeda) versus volume outorgado nessa área (em milhões de m³) por ano hidrológico (1999-2019), demonstrando que desde 2004 o volume de outorgas para mineração supera a reserva renovável do Aquífero Cauê. Os volumes de bombeamento outorgados anualmente em toda a área foram somados, e o resultado é representado pela linha vermelha.

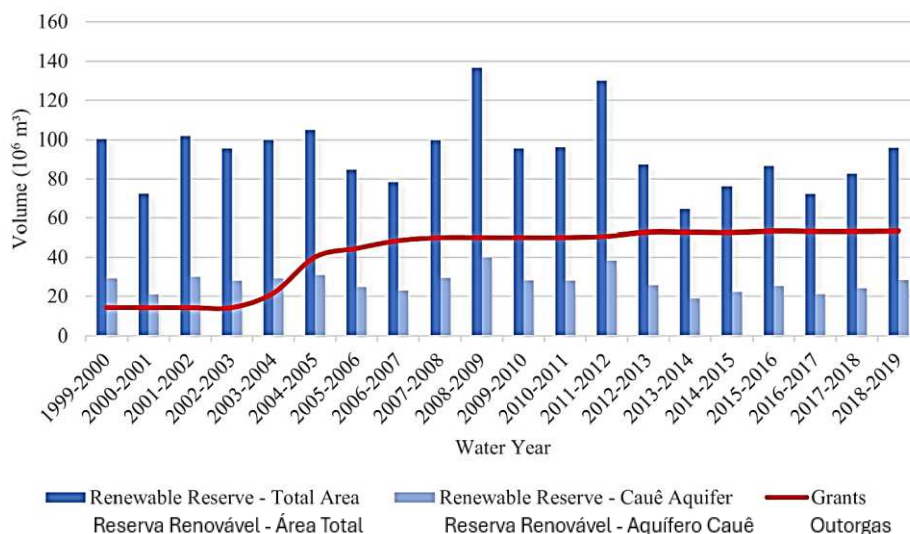


Fig. 5 - Resultados obtidos para os cálculos da reserva renovável em comparação com as outorgas para empreendimentos de mineração. **Fonte:** Magalhães et. al (2022)

A partir do gráfico, observa-se que nos anos de maior seca, como 2013/2014, o volume extraído se aproxima da reserva renovável total da área. Isso sugere que há um impacto regional considerável resultante da exploração, mesmo considerando a contribuição de todo o sistema aquífero para o volume explorado, o que pode afetar a disponibilidade hídrica da região.

O balanço hídrico descrito a seguir ilustra ainda mais essa situação. O volume médio da reserva renovável no Aquífero Cauê é de cerca de 27 milhões de m³/ano, enquanto em toda a área a reserva renovável é de aproximadamente 93 milhões de m³/ano. Assim, apesar de representar apenas 15% da área de estudo, o Aquífero Cauê contribui com cerca de 30% da recarga da região.

A Fig. 6 a seguir apresenta o gráfico da reserva renovável calculada para o Aquífero Cauê (Flanco **Oeste** do Sinclinal Moeda) comparada com vazão outorgada dos empreendimentos minerários (em m³/s) por ano hidrológico (1999-2019), demonstrando que desde 2009 o volume de outorgas para mineração supera a reserva renovável do Aquífero Cauê, resultando em déficits que chegaram a 3391 m³/h, o que indica a reversão do fluxo subterrâneo das demais unidades aquíferas para a unidade aquífera do Cauê.

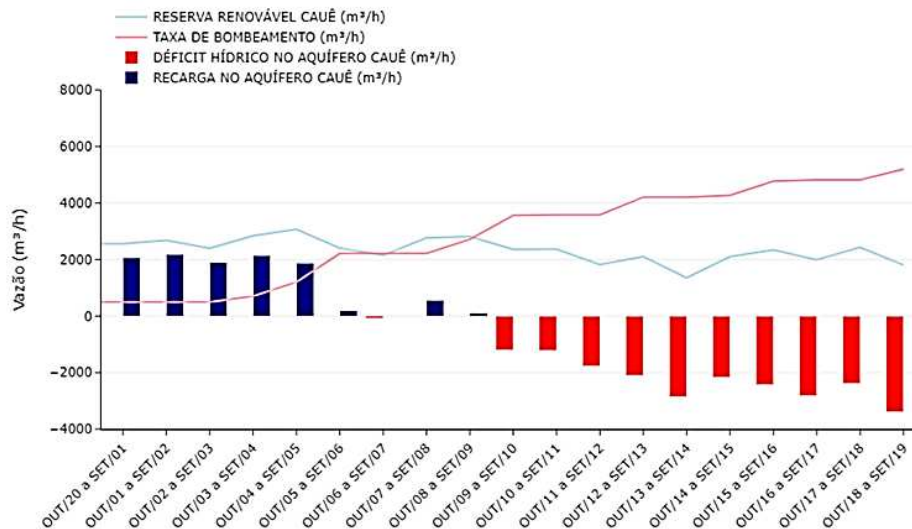


Figura 6. Excedente e déficit hídrico calculado considerando a taxa de recarga que infiltra (reserva renovável) da unidade aquífera Cauê e o quanto é bombeado (dados obtidos a partir da vazão outorgada dos empreendimentos). A partir do período de outubro de 2009 o volume d'água bombeado é superior a recarga. | S

Fonte: Andrade et. al (2025), Fig. 8

A Fig. 7 compara a taxa média regional da recarga subterrânea em com a taxa média da vazão que é explotada pelos poços de bombeamento de empreendimentos minerários no Aquífero Cauê e nas demais unidades aquíferas. A recarga da reserva renovável é dependente da pluviometria, ou seja, entre os anos de 2013 e 2014, período marcado por evento de seca intenso, a vazão bombeada é superior à taxa de recarga do Cauê e das unidades aquíferas.

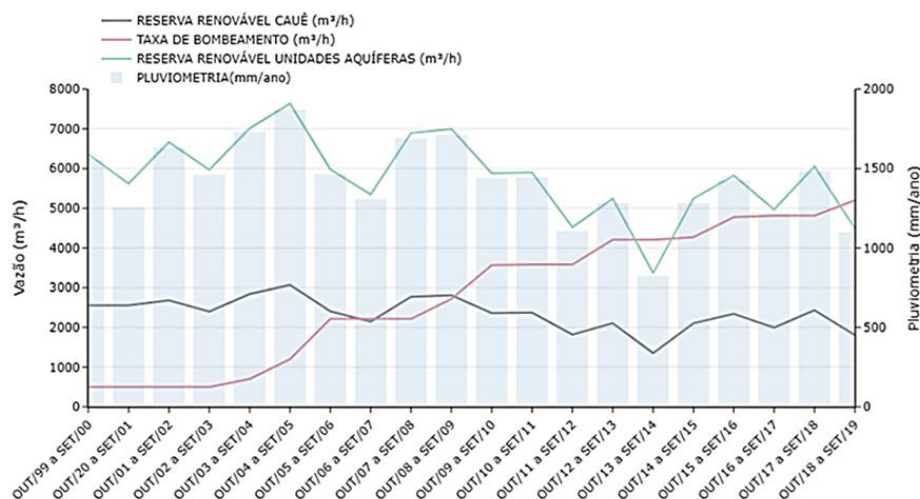


Figura 7. Taxa de recarga do Aquífero Cauê e das unidades aquíferas versus taxa de bombeamento – vazão explotada do aquífero em m³/h. Também são apresentados os dados anuais pluviométricos. Se observa que as flutuações da reserva renovável coincidem com as flutuações do índice de chuvas.

Fonte: Andrade et. al (2025), Fig. 7

Tanto nos estudos do Flanco Leste quanto nos do Flanco Oeste, o volume bombeado foi considerado igual ao volume outorgado pelo IGAM para as áreas de mineração, visto que não há dados confiáveis disponíveis sobre a taxa de bombeamento exata de cada mina. Ou seja, **os cálculos consideraram que a vazão bombeada em cada empreendimento minerário respeita o limite máximo outorgado. Adicionalmente, não foram consideradas nos cálculos as captações**

superficiais e as de águas subterrâneas realizadas para abastecimento público ou irrigação, tais como as realizadas por condomínios e unidades residenciais, agrícolas, comerciais e industriais, muitas das quais podem não ter outorgas. Assim, **pode-se afirmar que os impactos reais são ainda maiores que os apresentados no gráfico abaixo.**

9.4 Projeções futuras no flanco leste (2019–2039)

O modelo numérico de Pacheco Neto et al. (2026) realizou simulações para o período 2019-2039, assumindo a manutenção das taxas de bombeamento de 2019 (52 milhões de m³/ano). Os resultados indicam um rebaixamento adicional médio de 7,4 m em toda a área, além do já ocorrido entre 1999 e 2019. O Setor Central 2 deverá apresentar o maior impacto adicional, com rebaixamento de 10,8 m, seguido do Setor Norte (7,6 m) e do Setor Central 1 (6,5 m). O Setor Sul, devido à ausência de minas com bombeamento, deverá sofrer apenas 0,5 m adicionais. **A redução do fluxo de base projetada para 2039 é de 7,6% em relação a 2019, adicionando-se aos 13,6% já verificados no período 1999-2019.** Assim, o declínio total acumulado do fluxo de base entre 1999 e 2039 poderá atingir cerca de 20% na média regional, com o Setor Central 2 sofrendo redução de até 17,8% apenas no período 2019-2039.

Algumas drenagens específicas foram projetadas como as mais afetadas: o Córrego Cascalheira deverá sofrer redução de 54,1% do fluxo de base entre 2019 e 2039, em função de três cavas minerárias em seu entorno no Setor Central 2. O Córrego Fechos, alimentado pelo carste do Aquífero Gandarela no Setor Norte, deverá ter redução de 14,7% no mesmo período. O modelo ressalva que esses valores não consideram eventuais recomposições artificiais que algumas empresas mineradoras realizam em cursos d'água para mitigar os impactos (PACHECO NETO et al., 2026).

Tabela 4 – Rebaixamento adicional projetado (2019–2039) e redução de fluxo de base por setor, segundo Pacheco Neto et al. (2026).

Setor	Rebaixamento adicional médio (2019–2039, m)	Redução adicional de fluxo de base (%)
Central 2	10,8	17,8%
Norte	7,6	7,4%
Central 1	6,5	5,2%
Sul	0,5	0,04%
Total (média)	7,4	7,6%

9.5 Superexploração e déficit hídrico: flanco oeste

No flanco oeste do Sinclinal Moeda, Andrade et al. (2025) documentaram um padrão de superexploração progressiva que guarda analogias com o observado no flanco leste, embora com menor intensidade. A análise da evolução temporal da vazão outorgada para bombeamento, em comparação com a reserva renovável do Aquífero Cauê, revelou que **desde outubro de 2009 o volume bombeado pelos empreendimentos passou a superar a reserva renovável do Aquífero Cauê no flanco oeste. Em 2019, o déficit hídrico atingiu 3.391 m³/h, o que indica que o volume extraído excede em cerca de 3.391 m³/h a capacidade de reposição natural do aquífero (ANDRADE et al., 2025).**

A vazão outorgada total nos empreendimentos do flanco oeste cresceu progressivamente de 500 m³/h no período 1999-2003 para 5.199 m³/h no período 2018-2019, representando um aumento

de mais de dez vezes em duas décadas (ANDRADE et al., 2025). A análise do balanço hídrico mostrou que a entrada total de água no sistema aquífero do flanco oeste varia entre 3.000 m³/h em períodos de estiagem e 8.000 m³/h em períodos chuvosos, com aproximadamente 40% dessa entrada proveniente do Aquífero Cauê. **O balanço hídrico apontou que a exploração contínua tem suprimido a contribuição natural do Aquífero Cauê desde 2006, com taxas de retirada superiores à taxa de recarga, resultando em mudanças no fluxo natural e afetando as unidades aquíferas adjacentes** (ANDRADE et al., 2025).

9.6 Rebaixamento do nível d'água: flanco oeste

O mapa potenciométrico de 2019 construído por Andrade et al. (2025) para o flanco oeste identifica quatro focos de superexploração com reversão de fluxo subterrâneo associados às cavas das minerações. O fluxo regional é N-S, em direção ao Rio Paraopeba, com componente local E-W. Em condições de bombeamento intenso, o fluxo local é redirecionado de E-W para N-S.

A série histórica piezométrica de 1999 a 2019 (82 poços e piezômetros) revela rebaixamento diferenciado por compartimento. Na porção norte, o nível d'água rebaixou em média 90 m. Na porção central, a redução foi de aproximadamente 40 m. Na porção sul, próximo das cavas mais profundas do Sinclinal Dom Bosco, os piezômetros mais próximos das cavas registraram rebaixamentos de até 140 m (ANDRADE et al., 2025). A zona não saturada ampliou-se consideravelmente nas áreas próximas das cavas minerárias, conforme documentado pelas superfícies saturadas e insaturadas tridimensionais elaboradas com o software Bentley.

Os piezômetros com carga hidráulica intermediária (entre 1.200 m e 1.300 m) estão situados próximos das cavas e são influenciados pelos cones de rebaixamento. À medida que se distancia das cavas, a carga hidráulica supera 1.300 m, indicando que o cone de rebaixamento não alcança essas áreas. No compartimento norte, o influxo subterrâneo para o Cauê captura água do Aquífero Gandarela a leste e dos Aquíferos Batatal e Moeda a oeste. No compartimento central, o Aquífero Gandarela é afetado com maior intensidade pela reversão de fluxo. No compartimento sul, o Cauê é influenciado em sua totalidade pela superexploração, comprometendo também o Aquífero Gandarela, que aflora localmente em forma de lentes (ANDRADE et al., 2025).

Tabela 5 – Síntese das condições de rebaixamento no flanco oeste do Sinclinal Moeda (ANDRADE et al., 2025).

Compartimento	Rebaixamento médio (m)	Aquíferos afetados além do Cauê	Observação
Norte	~90	Gandarela (leste), Moeda e Batatal (oeste)	Cone de rebaixamento estendido
Central	~40	Gandarela (maior intensidade)	Reversão de fluxo E-W e N-S
Sul	~140 (próx. cavas)	Gandarela (afloram. em lentes)	Maior profundidade de cavas; desconexão hidráulica local pelo aquícluído Sabará

9.7 Impactos sobre os rios e o abastecimento urbano

O Aquífero Cauê é o principal responsável pela manutenção dos rios perenes da região, dado o BFI de 63% calculado por Magalhães et al. (2022) para o flanco leste (a fração do escoamento fluvial sustentada pelo aporte subterrâneo). Essa importância é ainda maior considerando que **o Rio das Velhas é responsável por fornecer água a mais de 70% da população de Belo**

Horizonte e a 40% dos 6 milhões de habitantes da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (MAGALHÃES et al., 2022; PACHECO NETO et al., 2026).

O processo de rebaixamento do nível freático pela mineração reduz o fluxo de base dos cursos d'água, ameaçando a perenidade de rios e córregos da região. A redução do fluxo de base projetada por Pacheco Neto et al. (2026) – somando os 13,6% verificados em 1999-2019 e os 7,6% projetados para 2019-2039 – representa um **comprometimento acumulado de cerca de 20% da contribuição subterrânea para os rios da região até 2039, com impactos diretos sobre o abastecimento da RMBH.**

A situação foi agravada pelo rompimento da barragem do Córrego do Feijão em Brumadinho, em 2019, que contaminou parte do Rio Paraopeba e sobrecarregou o sistema de abastecimento do Rio das Velhas (MAGALHÃES et al., 2022; PACHECO NETO et al., 2026). Em 2018 já havia sido solicitada declaração de área de conflito pelo uso da água na bacia do Alto Rio das Velhas, dado o alto nível de demanda hídrica da região.

A vulnerabilidade do abastecimento urbano de grandes metrópoles às pressões combinadas de escassez hídrica, contaminação e mudanças no uso do solo foi objeto de um modelo conceitual desenvolvido por Melo et al. (2021), publicado no *Journal of Hydrology*. O estudo propõe uma metodologia inédita que acopla a avaliação do nível de segurança hídrica de um manancial – baseada na qualificação de indicadores de pressão como demanda hídrica, contaminantes ordinários e acidentais, secas e cobertura florestal da bacia – com uma avaliação de risco estruturada segundo análise de modos de falha (FMEA, *Failure Mode and Effects Analysis*), que incorpora as propriedades de severidade, ocorrência e detectabilidade de cada pressão.

Aplicado a sistemas de abastecimento de grandes regiões metropolitanas, o modelo demonstrou que as falhas de abastecimento raramente derivam de uma causa isolada, mas da interação de múltiplas pressões simultâneas: a redução do fluxo de base dos rios por depleção dos aquíferos – exatamente o fenômeno documentado para o Rio das Velhas e o Paraopeba, afluentes do São Francisco e mananciais estratégicos da RMBH – eleva o risco de escassez ao mesmo tempo em que concentra contaminantes e reduz a capacidade de diluição, o que amplia a probabilidade de falha simultânea nos dois eixos críticos de quantidade e qualidade.

O modelo indica que sistemas com baixa cobertura florestal nas zonas de recarga, alta demanda per capita e histórico de secas recorrentes apresentam perfil de risco composto particularmente elevado, condições que caracterizam precisamente as bacias fornecedoras de água à RMBH (MELO et al., 2021).

9.8 A crise hídrica de 2014-2015

A crise hídrica de 2014-2015 nos mananciais de abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte, alimentados pelos rios das Velhas e Paraopeba, afluentes do São Francisco em território mineiro, foi objeto de avaliação quantitativa por Melo et al. (2020).

Aplicando um Índice de Segurança Hídrica calculado pela relação entre oferta e demanda de água bruta nos quatro principais sistemas produtores da RMBH (Manso, Serra Azul, Vargem das Flores e Rio das Velhas), os autores demonstraram que a oferta hídrica sofreu queda de quase 50% entre o período de referência (janeiro/2011 a março/2014) e o período de crise no Sudeste (abril a dezembro/2014), enquanto a demanda cresceu 7% no mesmo intervalo, colocando o índice no status de alerta.

No período de crise oficial em Minas Gerais (janeiro a dezembro de 2015), o índice escalou de 22,2% para 26,4%, com ápice em outubro de 2015, tendo o Sistema Serra Azul registrado o pior desempenho, com vazões sempre inferiores à média histórica durante todo o triênio 2013-2015. A recuperação foi obtida pela combinação de três fatores: gestão da oferta (construção de

adutora emergencial no Paraopeba, responsável por 20,9% do incremento dos volumes dos reservatórios), gestão da demanda (campanhas de redução do consumo que diminuíram a retirada em 14% e evitaram redução adicional de 9,6% do volume equivalente dos reservatórios durante o pico da crise) e precipitação (responsável por apenas 4,1% da recuperação no período dezembro/2015–junho/2016).

O estudo concluiu que, apesar de bem-sucedidas em evitar o racionamento, as ações empreendidas foram essencialmente reativas, evidenciando a ausência de uma gestão preventiva baseada em monitoramento sistemático, alertas precoces e planos de contingência, fragilidades que persistem como vulnerabilidade estrutural do sistema de abastecimento metropolitano frente a novas e progressivamente mais severas secas hidrológicas (MELO et al., 2020).

10 Perdas Hídricas em Outras Partes da Bacia do Rio São Francisco

10.1 Tendências de depleção do armazenamento subterrâneo

A Bacia do Rio São Francisco está inserida na chamada Região 3 da classificação de tendências emergentes de Getirana et al. (2026), caracterizada como a região de depleção mais severa de armazenamento subterrâneo em todo o Brasil central. As análises de Camacho (2025) revelam que a bacia apresenta tendência negativa de armazenamento subterrâneo de -6 mm/ano no período 2002-2015, que se intensificou para -26 mm/ano após o El Niño 2015/2016.

O mapa de tendência do GWS mostra que **a maior concentração de perdas ocorre na região central de Minas Gerais**, estendendo-se para o oeste da Bahia. Nas áreas com tendência negativa significativa no Brasil todo, a perda acumulada entre 2002 e 2023 é de 524,98 km³, sendo a maior contribuição proveniente da área da bacia do São Francisco e seu entorno (CAMACHO, 2025).

A dependência crescente das águas subterrâneas como fonte alternativa durante períodos de escassez hídrica superficial na Bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais foi documentada quantitativamente por Carvalho et al. (2024). Analisando os requerimentos de outorga de captação de água subterrânea na porção mineira da bacia no período 2009-2018, os autores identificaram relação direta e estatisticamente significativa entre as anomalias negativas de precipitação, avaliadas segundo os critérios de situação crítica de escassez hídrica estabelecidos pela Deliberação Normativa CERH/MG nº 49/2015, e o aumento dos pedidos de licenciamento de novas captações subterrâneas, com pico nos anos de 2014 a 2018, período que coincide com a seca mais intensa registrada por satélite no centro-sul do Brasil (GETIRANA, 2016; GETIRANA et al., 2021).

Os resultados evidenciam que cada evento severo de estiagem gera uma onda de novas perfurações e solicitações de outorga que pressiona os aquíferos justamente nos momentos em que sua recarga é mais baixa, aprofundando a depleção e reduzindo a capacidade de resiliência do sistema hídrico subterrâneo para o ciclo seco seguinte. Esse padrão de retroalimentação negativa – secas superficiais induzindo maior exploração subterrânea, que agrava a queda do fluxo de base dos rios – é consistente com os mecanismos identificados por Chagas, Chaffe e Blöschl (2022) e reforça a urgência de vincular os limites de outorga de água subterrânea à recarga efetivamente monitorada e não apenas à demanda declarada (CARVALHO et al., 2024).

10.2 Rios perdedores na Bacia do São Francisco

Uchôa et al. (2024) demonstraram que mais de 61% dos rios avaliados nas Unidades de Gerenciamento da Bacia do São Francisco podem ser classificados como potencialmente perdedores, e que na Unidade Verde Grande (afluente do São Francisco no norte de Minas

Gerais e sul da Bahia) essa proporção atinge 74%, uma das mais críticas do país. A proporção de poços com nível abaixo da superfície d'água do rio excede 60% em toda a extensão da bacia. Em 36 dos 40 rios potencialmente perdedores com dados de vazão (1970-2023), identificou-se tendência negativa de descarga e de fluxo de base (Mann-Kendall, $\alpha = 0,05$).

A Bacia do Rio Verde Grande, cujas características de conflito hídrico associado à irrigação são analisadas em detalhe no Item 7, constitui o caso mais crítico no âmbito da bacia do São Francisco em relação à proporção de rios perdedores.

10.3 Perdas no Aquífero Urucuia

O Sistema Aquífero Urucuia, que aflora no oeste da Bahia e integra a cabeceira hidrológica do médio São Francisco, apresenta perdas de armazenamento sustentadas durante todo o período 2002-2023, com recarga zero em determinados anos, especialmente em 2015. Camacho (2025) estimou que o aquífero Urucuia perdeu cerca de 31 km³ de água durante o período de estudo, com taxa de recarga média calculada de apenas 10% da precipitação, valor inferior ao esperado de 12% a 24%.

A taxa de extração para irrigação na região é expressiva, com alta densidade de pivôs centrais sobrepostos à zona de ocorrência do aquífero. Os impactos quantitativos dessa extração sobre o fluxo de base do Rio São Francisco e sobre o armazenamento do Urucuia são detalhados no Item 7 desta Nota Técnica.

10.4 Outros aquíferos afetados em Minas Gerais

Os aquíferos Bauru-Caiuá e Guarani (zona de afloramento), associados à Bacia do Rio Paraná e presentes no sul e sudoeste de Minas Gerais, apresentam tendências negativas de armazenamento ao longo de 2002-2023. Para o Bauru-Caiuá, a tendência é de $-6,98 \pm 1$ mm/ano, e para o Guarani de $-4,1 \pm 0,7$ mm/ano (GETIRANA et al., 2026). As bacias do Atlântico Sudeste e Atlântico Leste também integram a Região 3 de depleção severa, sendo afetadas pelos impactos da mineração no Quadrilátero Aquífero-Ferrífero que se propagam pela bacia do Rio das Velhas (GETIRANA et al., 2026; CAMACHO, 2025).

As bacias do Atlântico Leste e Atlântico Sudeste, que drenam a vertente leste e sudeste de Minas Gerais em direção ao Oceano Atlântico, integram a Região 3 de depleção severa de Getirana et al. (2026), juntamente com a Bacia do São Francisco. Camacho (2025) identifica que a Bacia do Atlântico Sudeste apresenta comportamento de perda de armazenamento após 2020, enquanto a Bacia do Atlântico Leste exibe padrão oposto de ganho de armazenamento no mesmo período, possivelmente em resposta a eventos de precipitação intensa associados à La Niña que atingiram a costa leste do Brasil a partir de 2020.

Os impactos da mineração no Quadrilátero Aquífero-Ferrífero mineiro estendem seus efeitos sobre as bacias do Atlântico Sudeste e Atlântico Leste, conforme apontado por Getirana et al. (2026), dada a conectividade hidrológica entre o Rio das Velhas (São Francisco) e os sistemas de drenagem atlântica no sudeste mineiro. A presença de licenças de lavra para mineração na região correlaciona-se moderadamente com as tendências negativas de armazenamento, com correlação de Pearson de 0,10, classificada como fraca, segundo Camacho (2025), o que indica que, embora o sinal seja real, outros fatores (secas, uso para irrigação e variabilidade climática) têm peso maior na explicação das perdas de armazenamento nessas bacias.

O Sistema Aquífero Bambuí, formado pelo Grupo Bambuí do Neoproterozoico (entre 1 bilhão e 538 milhões de anos), constitui um dos maiores sistemas aquíferos carbonáticos do Brasil, ocorrendo principalmente nos estados de Minas Gerais e Bahia, no entorno do cráton do São Francisco. Em sua porção carbonática (cárstica), o aquífero Bambuí exibe taxas de recarga

relativamente elevadas, de até 18% da precipitação local, sendo o mais eficiente em termos de recarga entre todos os sistemas aquíferos analisados por Getirana et al. (2026) e Camacho (2025). Em sua porção terrígena, porém, o aquífero apresenta tendência de perda de armazenamento inserida na Região 3, sendo afetado pelos mesmos fatores que impactam os demais aquíferos do centro-oeste mineiro: secas prolongadas, uso para irrigação e mudanças climáticas (CAMACHO, 2025).

11 Influência do El Niño e da La Niña sobre os Recursos Hídricos

O evento El Niño 2015/2016, de intensidade excepcional, provocou redução marcante da precipitação em toda a Bacia do São Francisco, acelerando dramaticamente a queda do GWS. A análise de Camacho (2025) revela que o armazenamento subterrâneo na bacia passou de tendência de -6 mm/ano (2002-2014) para -26 mm/ano (2015-2023), representando uma intensificação de mais de quatro vezes.

O ano de 2015 registrou o menor valor nacional de recarga de toda a série (159 ± 16 mm/ano, ou 1.354 ± 136 km³/ano), com recarga zero observada nos aquíferos Urucuia, Formação Serra Geral, Formação Botucatu e Embasamento Cristalino (GETIRANA et al., 2026; CAMACHO, 2025). No âmbito local, a seca de 2014-2015 também impactou o Sinclinal Moeda: Magalhães et al. (2022) destacam que nesse ano hidrológico o volume bombeado pelas minas se aproximou da reserva renovável de toda a área estudada (93 milhões de m³/ano), não apenas do Cauê.

Da mesma forma, o ano de 2015 foi o de menor recarga registrada no Aquífero Urucuia (ver Item 9. 3), coincidindo com o período de maior crescimento da área irrigada no Noroeste de Minas Gerais e no oeste baiano (Item 7), o que potencializou os efeitos do El Niño sobre a depleção subterrânea regional por meio da combinação de menor recarga e maior extração para irrigação.

Os eventos La Niña produzem efeito assimétrico. Enquanto o interior da bacia do São Francisco responde predominantemente ao El Niño, as bacias da vertente atlântica (Atlântico Sudeste e Atlântico Leste) tendem a receber precipitação acima da média durante eventos La Niña, em função do mecanismo de transporte de umidade associado à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Getirana et al. (2026) e Camacho (2025) identificam tendências positivas de armazenamento subterrâneo nas bacias costeiras atlânticas após 2020, período marcado por La Niñas sucessivas. Elevados níveis de armazenamento subterrâneo nessas bacias reduzem a capacidade de infiltração dos solos, aumentando o escoamento superficial e a probabilidade de inundações.

12 Síntese Quantitativa das Perdas e Ganhos Hídricos

A Tabela 6 reúne os principais indicadores quantitativos de perda e ganho hídrico subterrâneo identificados nos estudos para a região de interesse, com foco no Sinclinal Moeda e na Bacia do São Francisco. Os indicadores relativos aos impactos da irrigação agrícola encontram-se sistematizados na Tabela 1 da seção 7:



Tabela 6 – Síntese das principais métricas de perda hídrica na região estudada

Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
A. BRASIL – CONTEXTO NACIONAL (águas subterrâneas e superficiais)			
Brasil – Sudeste (seca 2012–2015)	Taxa de perda hídrica TWSA	–6,1 cm/ano = –56 km ³ /ano	Getirana (2016)
Brasil – Nordeste (seca 2012–2015)	Taxa de perda hídrica TWSA	–3,2 cm/ano = –49 km ³ /ano	Getirana (2016)
Brasil – Sudeste	Pior registro TWSA (jan/2015)	–15,7 cm (–146 km ³)	Getirana (2016)
Brasil – Centro-Sul (mar–mai/2021)	Déficit total de armazenamento	–267 km ³ vs. média sazonal das 2 décadas anteriores	Getirana; Libonati; Cataldi (2021)
Brasil (áreas c/ tendência negativa)	Perda acumulada GWS (2002–2023)	524,98 km ³	Camacho (2025)
Brasil – média nacional	Recarga anual média GWS (2002–2023)	223 ± 16 mm/ano ≈ 1.900 ± 136 km ³ /ano (≈ 12% da precipitação)	Getirana et al. (2026); Camacho (2025)
Brasil – ano mais seco (2015)	Menor recarga anual registrada	159 ± 16 mm/ano = 1.354 ± 136 km ³ /ano	Getirana et al. (2026)
Brasil – ano de maior recarga (2021)	Maior recarga anual registrada	274 ± 16 mm/ano = 2.333 ± 136 km ³ /ano	Getirana et al. (2026)
Brasil – monitoramento de GWS	Poços na rede federal (RIMAS)	~500 poços (vs. > 16.000 nos EUA e > 22.000 na Índia)	Getirana et al. (2026); Getirana; Libonati; Cataldi (2021)
Brasil – rios avaliados	Proporção de rios potencialmente perdedores	56,4% dos rios avaliados	Uchôa et al. (2024)
A.1 – Ressecamento e aceleração do ciclo hidrológico (Chagas, Chaffe e Blöschl , 2022 – período 1980–2015, 886 estações)			



Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
Brasil – padrão de ressecamento (<i>drying</i>)	Extensão territorial	42% da área de estudo = 3,9 milhões de km ² (supera os 35% esperados em distribuição aleatória)	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – padrão de aceleração	Extensão territorial	29% da área de estudo = 2,7 milhões de km ² (2× o esperado aleatoriamente = 15%)	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – padrão de umedecimento (<i>wetting</i>)	Extensão territorial	25% da área de estudo = 2,4 milhões de km ²	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – padrão de desaceleração	Extensão territorial	4% da área de estudo = 0,4 milhões de km ²	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – domínio completo (1980–2015)	Tendência média das vazões de estiagem	–5% por década	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – centro-leste (hotspot Planalto Brasileiro / MG)	Tendência máxima das vazões de estiagem	Até –37% por década	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – domínio completo (1980–2015)	Tendência média das vazões de cheia	–1% por década	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – 886 estações	Estações com redução significativa da vazão mínima	353 de 886 ($\alpha = 0,05$); apenas 56 com aumento	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – 886 estações	Estações com redução significativa da vazão máxima	104 de 886; 51 com aumento	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – Planalto Brasileiro (MG e entorno)	Período de retorno da seca de 10 anos em 1980	Tornou-se seca de 1 ano em 2015 – evento anual recorrente	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Brasil – Amazônia meridional	Período de retorno da cheia de 100 anos em 1980	Tornou-se cheia de 25 anos em 2015	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)



Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
Brasil – área irrigada	Expansão da irrigação (1980–2015)	De 15.000 km ² para 70.000 km ² (+367%); responde por 68% do uso consuntivo de água em 2017	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022)
Minas Gerais – quase todo o estado (estiagem, 1980–2015)	Redução das vazões de estiagem por década (leitura da Fig. 3a)	–12% a –18% por década	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022) – Fig. 3a (análise visual da NT)
Minas Gerais – extremo sul e extremo oeste (estiagem, 1980–2015)	Redução das vazões de estiagem por década (leitura da Fig. 3a)	–6% a –12% por década	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022) – Fig. 3a (análise visual da NT)
Minas Gerais – quase todo o estado (estiagem, 1980–2025, 45 anos)	Redução acumulada estimada das vazões de estiagem	–54% a –81% (extrapolação mantendo tendência 1980–2015)	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022) – projeção da NT
Minas Gerais – extremo sul e extremo oeste (estiagem, 1980–2025, 45 anos)	Redução acumulada estimada das vazões de estiagem	–27% a –54% (extrapolação mantendo tendência 1980–2015)	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022) – projeção da NT
Minas Gerais – extremo norte (período úmido, 1980–2025, 45 anos)	Redução acumulada estimada das vazões de período úmido	–54% a –81%	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022) – Fig. 3b; projeção da NT
Minas Gerais – norte, noroeste, Triângulo Mineiro e extremo sul (período úmido, 1980–2025)	Redução acumulada estimada das vazões de período úmido	–27% a –54%	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022) – Fig. 3b; projeção da NT
Minas Gerais – faixas do leste e do centro (período úmido, 1980–2025)	Redução acumulada estimada das vazões de período úmido	< –27%	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022) – Fig. 3b; projeção da NT



Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
Minas Gerais – pequena área do sudeste (período úmido)	Comportamento das vazões de período úmido	Única área sem redução (leve aumento)	Chagas; Chaffe; Blöschl (2022) – Fig. 3b; projeção da NT
B. BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO – perdas de armazenamento subterrâneo			
Bacia do São Francisco (2002–2015)	Tendência de depleção GWS	–6 mm/ano	Camacho (2025)
Bacia do São Francisco (2015–2023)	Tendência de depleção GWS (pós-El Niño 2015/2016)	–26 mm/ano (intensificação > 4×)	Camacho (2025)
Bacia do São Francisco	Rios potencialmente perdedores	> 61% dos rios avaliados	Uchôa et al. (2024)
Unidade de Gerenciamento do Verde Grande	Rios potencialmente perdedores	74% (a mais alta entre as unidades avaliadas)	Uchôa et al. (2024)
Bacia do São Francisco (médio curso)	Redução da contribuição do Urucuia ao rio	792 m³/s (1980) → 390 m³/s (2015): queda de > 50% em 35 anos	Gonçalves et al. (2020) apud Lucas et al. (2021)
Bacia do São Francisco	Fração da redução de vazão atribuída ao declínio do fluxo de base	≥ 86%	Lucas et al. (2021)
Aquífero Urucuia	Perda acumulada de armazenamento (2002–2023)	~31 km³	Camacho (2025); Getirana et al. (2026)
Aquífero Urucuia (2003–2014)	Taxa de declínio do armazenamento	–6,5 ± 2,6 mm/ano (≈ 9,75 km³)	Gonçalves et al. (2020)
Aquífero Urucuia	Taxa de recarga média	~10% da precipitação (inferior ao esperado de 12–24%)	Camacho (2025)
Aquífero Bauru-Caiuá	Tendência de depleção GWS	–6,98 ± 1 mm/ano	Getirana et al. (2026)



Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
Aquífero Guarani (afloramento)	Tendência de depleção GWS	-4,1 ± 0,7 mm/ano	Getirana et al. (2026)
Bacia do São Francisco – porção mineira (2009–2018)	Outorgas de água subterrânea × escassez	Relação direta e significativa entre anomalias negativas de precipitação e aumento dos requerimentos de outorga; pico em 2014–2018	Carvalho et al. (2024)
C. IRRIGAÇÃO AGRÍCOLA – perdas hídricas em Minas Gerais e na Bacia do São Francisco			
Bacias no Aquífero Urucuia (irrigação)	Aumento da duração máxima de baixa vazão	+191,7% a +1.315,7% vs. condições naturais estimadas	Rodrigues et al. (2024)
Bacias no Aquífero Urucuia (irrigação)	Déficit de baixa vazão vs. condições naturais	Até 7.150%	Rodrigues et al. (2024)
Bacia do Rio Paracatu	Participação da irrigação no consumo hídrico total	86,6%	Atlas das Águas de Minas (2007)
Bacia do Rio Verde Grande	Participação da irrigação no consumo hídrico total	90%	Uchôa et al. (2024)
Norte de Minas Gerais (IGAM)	Áreas com limite outorgável 100% atingido	8 áreas – sem novas outorgas possíveis	IGAM / Agência Minas (2024)
Minas Gerais – geral (2019)	Área total irrigada por pivôs centrais	478.588 ha / 8.115 pivôs	ANA (2021)
Paracatu (MG)	Área irrigada por pivôs centrais (2024)	88.889 ha (2º maior município do Brasil)	Guimarães; Landau (2024)
Unaí (MG)	Área irrigada por pivôs centrais (2024)	81.246 ha (3º maior município do Brasil)	Guimarães; Landau (2024)



Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
Brasil (2024)	Total de área irrigada por pivôs centrais	2,2 milhões de ha / 33.846 pivôs (+140.842 ha em 2 anos)	Guimarães; Landau (2024)
Bacia do Rio Paracatu	Declarações de Área de Conflito (DAC) acumuladas	58 DACs (2005–2020), 55 entre irrigantes	IGAM (2020)
Tendência GWS × densidade de pivôs	Correlação (Pearson)	0,33 (moderada)	Camacho (2025)
D. SINCLINAL MOEDA – FLANCO LESTE (1999–2019 e projeções 2019–2039)			
Sinclinal Moeda – fl. leste (área: 305 km ²)	Volume bombeado – média 1999–2019	41 × 10 ⁶ m ³ /ano	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste (2019)	Volume bombeado no ano-pico	52 × 10 ⁶ m ³ /ano	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste	Extração vs. reserva renovável do Cauê	≥ 150% da reserva renovável (27 × 10 ⁶ m ³ /ano) – superexploração desde 2004	Magalhães et al. (2022)
Sinclinal Moeda – fl. leste	Declínio anual de armazenamento (GRACE)	134,4 mm/ano (= 0,041 km ³ /ano sobre 305 km ²) – detectável por satélite	Getirana et al. (2026); Magalhães et al. (2022)
Sinclinal Moeda – fl. leste (1999–2019)	Rebaixamento médio do Aquífero Cauê (isosuperfície)	10,4 m	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste (1999–2019)	Rebaixamento máximo observado (piezômetro)	Até 80 m (Setor Central 1)	Magalhães et al. (2022)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Central 2 (1999–2019)	Rebaixamento médio (isosuperfície / pontos obs.)	11,6 m / 32,9 m	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Norte (1999–2019)	Rebaixamento médio (isosuperfície / pontos obs.)	5,1 m / 15,4 m	Pacheco Neto et al. (2026)



Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Central 1 (1999–2019)	Rebaixamento médio (isosuperfície / pontos obs.)	5,5 m / 5,9 m	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Sul (1999–2019)	Rebaixamento médio (isosuperfície)	1,0 m	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste (1999–2019)	Redução total do fluxo de base (área modelada)	–13,6%	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Central 2 (1999–2019)	Redução do fluxo de base	–21,6%	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Norte (1999–2019)	Redução do fluxo de base	–13,7%	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Central 1 (1999–2019)	Redução do fluxo de base	–9,4%	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Sul (1999–2019)	Redução do fluxo de base	–6,2%	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste (projeção 2019–2039)	Rebaixamento adicional médio (total área)	7,4 m	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Central 2 (projeção 2019–2039)	Rebaixamento adicional projetado	10,8 m	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Norte (projeção 2019–2039)	Rebaixamento adicional projetado	7,6 m	Pacheco Neto et al. (2026)



Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Central 1 (projeção 2019–2039)	Rebaixamento adicional projetado	6,5 m	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Sul (projeção 2019–2039)	Rebaixamento adicional projetado	0,5 m	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste (projeção 2019–2039)	Redução adicional do fluxo de base	–7,6% (acumulado 1999–2039: ~–20%)	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste, Setor Central 2 (projeção 2019–2039)	Redução adicional do fluxo de base	–17,8%	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste – Córrego Cascalheira (projeção 2019–2039)	Redução projetada do fluxo de base	–54,1%	Pacheco Neto et al. (2026)
Sinclinal Moeda – fl. leste – Córrego Fechos (projeção 2019–2039)	Redução projetada do fluxo de base	–14,7%	Pacheco Neto et al. (2026)
E. SINCLINAL MOEDA – FLANCO OESTE (1999–2019)			
Sinclinal Moeda – fl. oeste (~470 km ²)	Crescimento da vazão outorgada para mineração	500 m ³ /h (1999–2003) → 5.199 m ³ /h (2018–2019): aumento de > 10× em 2 décadas	Andrade et al. (2025)
Sinclinal Moeda – fl. oeste	Início da superexploração do Cauê	Outubro de 2009 (extração supera reserva renovável do Cauê desde então)	Andrade et al. (2025)
Sinclinal Moeda – fl. oeste (2019)	Déficit hídrico do Aquífero Cauê	3.391 m ³ /h (volume extraído excede em 3.391 m ³ /h a reposição natural do aquífero)	Andrade et al. (2025)



Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
Sinclinal Moeda – fl. oeste (1999–2019), compartimento norte	Rebaixamento médio observado	~90 m	Andrade et al. (2025)
Sinclinal Moeda – fl. oeste (1999–2019), compartimento central	Rebaixamento médio observado	~40 m	Andrade et al. (2025)
Sinclinal Moeda – fl. oeste (1999–2019), compartimento sul	Rebaixamento máximo observado (próximo às cavas)	Até ~140 m	Andrade et al. (2025)
Sinclinal Moeda – fl. oeste	Reversão do fluxo nos aquíferos adjacentes	Cauê passou a capturar água do Gandarela e Moeda (invertendo fluxo natural) – desde 2006	Andrade et al. (2025)
F. CRISE HÍDRICA 2014–2015 – RMBH (mananciais das Bacias Velhas e Paraopeba)			
RMBH – sistemas produtores (abr–dez/2014)	Queda da oferta hídrica nos reservatórios	–50% vs. período de referência (jan/2011–mar/2014)	Melo et al. (2020)
RMBH – mesmo período (abr–dez/2014)	Variação da demanda de água	+7% (demanda cresceu enquanto oferta caiu)	Melo et al. (2020)
RMBH – período jan–dez/2015	Índice de Segurança Hídrica (pico)	26,4% – status Alerta (ápice em outubro de 2015)	Melo et al. (2020)
RMBH – Sistema Serra Azul (2013–2015)	Desempenho do pior sistema produtor	Vazões sempre abaixo da média histórica durante todo o triênio	Melo et al. (2020)
RMBH – recuperação (dez/2015–jun/2016)	Contribuição da gestão da oferta (adutora Paraopeba)	Responsável por +20,9% do volume dos reservatórios	Melo et al. (2020)



Localização / Sistema	Indicador / Métrica	Valor / Resultado	Fonte
RMBH – recuperação (dez/2015–jun/2016)	Contribuição da gestão da demanda	Responsável por +12,2% do volume; evitou – 9,6% adicional no pico da crise	Melo et al. (2020)
RMBH – recuperação (dez/2015–jun/2016)	Contribuição da precipitação	+4,1% do volume (papel secundário)	Melo et al. (2020)
RMBH – campanha de redução (2015)	Redução total da demanda de água tratada	–14% (campanhas da COPASA para Belo Horizonte)	Melo et al. (2020)

Notas: (1) Os indicadores relativos aos impactos da irrigação agrícola estão parcialmente sistematizados também na Tabela 1 (seção 8). (2) As linhas marcadas como "análise visual da NT" ou "projeção da NT" referem-se a dados extraídos visualmente das Figs. 2 e 3 de Chagas; Chaffe; Blöschl (2022) pelo autor desta Nota Técnica, com base nas tendências de 1980–2015 extrapoladas para 1980–2025 (45 anos), assumindo manutenção das tendências observadas no período. (3) TWS = Terrestrial Water Storage; GWS = Groundwater Storage; TWSA = TWS Anomaly; GRACE = Gravity Recovery and Climate Experiment; RMBH = Região Metropolitana de Belo Horizonte; DAC = Declaração de Área de Conflito; Q7,10 = Vazão mínima de 7 dias com período de retorno de 10 anos.

13 Projeções Futuras e Perspectivas

As perspectivas futuras para os recursos hídricos da Bacia do Rio São Francisco e das demais bacias de Minas Gerais são preocupantes sob diferentes cenários. Hirata e Conicelli (2012), citados por Getirana et al. (2026) e Camacho (2025), projetam que a recarga na região semiárida do Brasil, que inclui partes da bacia do São Francisco, pode reduzir-se em até 70% em cenários de mudanças climáticas, impacto que se somaria aos processos de superexploração já documentados. Essa redução reflete a combinação de menor precipitação, maior evapotranspiração e alteração dos padrões sazonais de chuva esperados nos cenários do IPCC (CALVIN et al., 2023 apud GETIRANA et al., 2026). Uchôa et al. (2024) alertam que as áreas irrigadas no Brasil devem crescer mais de 50% nos próximos 20 anos, com a expansão ocorrendo principalmente nas regiões já deficitárias em termos de armazenamento subterrâneo, incluindo o entorno da Bacia do São Francisco.

Esse crescimento, sem mecanismos robustos de gestão conjunta das águas superficiais e subterrâneas, aumentará a proporção de rios perdedores e intensificará a depleção dos aquíferos regionais, especialmente nas bacias do Paracatu e do Verde Grande, no Norte e Noroeste de Minas Gerais, onde os conflitos hídricos já são críticos e os limites de outorga esgotados em múltiplas sub-bacias, como detalhado no Item 7. Nessas bacias, a combinação de expansão irrigada projetada com a redução de recarga por mudanças climáticas configura o cenário de maior risco hídrico futuro do estado.

Do ponto de vista climático, eventos extremos como o El Niño de 2015/2016 e as secas amazônicas de 2023-2024 indicam uma tendência de intensificação da variabilidade hidrológica no Brasil, com períodos de seca mais severos e mais frequentes intercalados com eventos de precipitação extrema. Esse padrão, associado à não estacionariedade do ciclo hidrológico brasileiro descrita por Chagas, Chaffe e Blöschl (2022), citados por Getirana et al. (2026) e Camacho (2025), reduz a confiabilidade das estimativas baseadas em condições históricas e reforça a necessidade de monitoramento contínuo e de modelos de gestão adaptativa.

Para o Sinclinal Moeda especificamente, o modelo numérico de Pacheco Neto et al. (2026) projetou que, mantidas as taxas de bombeamento de 2019 (52 milhões de m³/ano), o rebaixamento adicional médio entre 2019 e 2039 será de 7,4 m, com o Setor Central 2 sofrendo outros 10,8 m de declínio e a **redução do fluxo de base acumulada atingindo cerca de 20% entre 1999 e 2039. No flanco oeste, Andrade et al. (2025) concluem que a exploração contínua comprometerá as reservas permanentes do Aquífero Cauê, afetando a capacidade do recurso de atender às necessidades das gerações atuais e futuras. Ambos os estudos convergem na necessidade urgente de uma rede de monitoramento quantitativo regional e de um planejamento integrado de concessão de outorgas que considere a recarga efetiva e os impactos acumulados da mineração.**

14 Referências Bibliográficas

AGÊNCIA MINAS GERAIS. IGAM orienta produtores rurais para gestão das captações de recursos hídricos no Norte de Minas. Belo Horizonte: Governo de Minas Gerais, 19 jun. 2024. Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/igam-orienta-produtores-rurais-para-gestao-das-captacoes-de-recursos-hidricos-no-norte-de-minas>. Acesso em: 11 jun. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. 2. ed. Brasília: ANA, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada. 2. ed. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/atlasirrigacao/>. Acesso em: 11 jun. 2026.

ANDRADE, I. B. ; DE PAULA, R. S. ; TEIXEIRA, G. M. ; NOVO, T. A. ; DE MELO, M. C. ; COSTA, F. C. Investigação do Fluxo no Sistema Aquífero do Flanco Oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 18, n. 5, p. 3350-3376, 2025.

ANDRADE, I. B. ; RODRIGUES, A. S. ; DE PAULA, R. S. ; NOVO, T. A. Recarga dos Aquíferos no Flanco Oeste do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Brasília. Anais. . . ABRH, 2023.

ANDRADE, Isabella Brito. Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco oeste do Sinclinal Moeda: passado, presente e futuro do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais, Brasil. 2023. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/63320>. Acesso em: 14 jun. 2026.

ATLAS DAS ÁGUAS DE MINAS. Bacia do Rio Paracatu. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2007. Disponível em: https://www.atlasdasaguas.ufv.br/paracatu/resumo_paracatu.html Acesso em: 11 jun. 2026.

CAMACHO, C. R. Monitoramento das Águas Subterrâneas no Brasil a partir de Dados de Múltiplos Satélites e Métodos de Inteligência Artificial. 2025. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://coc.ufrj.br/lista-teses-de-doutorado/monitoramento-das-aguas-subterraneas-no-brasil-a-partir-de-dados-de-multiplos-satelites-e-metodos-de-inteligencia-artificial/?perpage=48&order=DESC&orderby=date&pos=14&source_list=collection&source_entity_id=41068&ref=%2Fteses-de-doutorado%2F%3Fperpage%3D48%26view_mode%3Dtable%26paged%3D1%26order%3DDESC%26orderby%3Ddate%26fetch_only%3Dstatus%26fetch_only_meta%3D41071%252C41076%252C41084%252C41100 Acesso em 10 jun. 2026

CAMACHO, C. R. ; GETIRANA, A. ; ROTUNNO FILHO, O. C. ; MOURÃO, M. A. A. Large-scale groundwater monitoring in Brazil assisted with satellite-based artificial intelligence techniques. *Water Resources Research*, v. 59, e2022WR033588, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022WR033588>

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, v. 13, 5136, 2022. DOI: 10.1038/s41467-022-32580-x

CARVALHO, J. D. ; MELO, M. C. ; GALVÃO, P. ; MIRANDA, W. L. ; LASMAR, B. E. Groundwater in water scarcity context in the São Francisco River Basin (MG). *Ambiente & Sociedade*, v. 27, e0177, 2024. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0177r5vu27l2oa>

DELIBERAÇÃO NORMATIVA CERH/MG nº 76, de 19 de abril de 2022. Dispõe sobre as condições e os procedimentos para regularização de captação de recursos hídricos subterrâneos. Belo Horizonte: Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais, 2022.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande: panorama geral. Documentos Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1167554/1/Bacia-Hidrografica-do-Rio-Verde-Grande-panorama-geral.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2026.

GETIRANA, A. ; CAMACHO, C. R. ; MOURÃO, M. A. A. ; ROTUNNO FILHO, O. C. Two decades of human- and climate-induced groundwater storage shifts in Brazil. *Science Advances*, v. 12, n. 23, eade0266, 2026. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aee0266>

- GETIRANA, A. Extreme water deficit in Brazil detected from space. *Journal of Hydrometeorology*, v. 17, p. 591-599, 2016. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>
- GETIRANA, A. ; LIBONATI, R. ; CATALDI, M. Brazil is in water crisis – it needs a drought plan. *Nature*, v. 600, p. 218-220, 2021. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-03625-w>
- GONÇALVES, R. D. ; STOLLBERG, R. ; WEISS, H. ; CHANG, H. K. Using GRACE to quantify the depletion of terrestrial water storage in Northeastern Brazil: The Urucuia Aquifer System. *Science of the Total Environment*, v. 705, 135845, 2020.
- GONÇALVES, R. D. ; STOLLBERG, R. ; WEISS, H. ; CHANG, H. K. Using GRACE to quantify the depletion of terrestrial water storage in Northeastern Brazil: The Urucuia Aquifer System. *Science of the Total Environment*, v. 705, 135845, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135845>.
- GUIMARÃES, D. P. ; LANDAU, E. C. Agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil em 2024. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2024. (Documentos Embrapa, 1167756). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1167756>. Acesso em: 11 jun. 2026.
- HIRATA, R. ; CONICELLI, B. P. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 84, n. 2, p. 297-312, 2012.
- IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Mapa das Áreas de Conflito Declaradas em Minas Gerais. Belo Horizonte: IGAM, 2020.
- IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paracatu. Belo Horizonte: IGAM, 2007.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Supercomputador Jaci começa a operar no enfrentamento a desafios climáticos brasileiros. Cachoeira Paulista: INPE, 11 dez. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias>. Acesso em: 15 jun. 2026.
- LUCAS, M. C. ; OLIVEIRA, G. ; GUIMARÃES, D. P. ; COSTA, A. M. ; NETO, A. M. ; BEVILACQUA, J. E. ; SOARES, A. ; VIEIRA, M. R. ; SILVA BONFIM, L. A. Significant baseflow reduction in the Sao Francisco River Basin. Is it time to call for attention on groundwater withdrawals? *Water*, v. 13, n. 2, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13010002>
- LUCAS, M. et al. Significant baseflow reduction in the Sao Francisco River Basin: is it time to call for attention on groundwater withdrawals? *Authorea*, 2020. <https://doi.org/10.22541/au.159225069.93952235>
- MAGALHÃES, C. C. de C. ; MELO, M. C. de; GUIGUER, N. ; PAULA, R. S. de. The Cauê Aquifer on the eastern limb of the Moeda Syncline: characterization, impacts, and flow in the western Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero), MG, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 52, n. 4, e20220005, 2022. <https://doi.org/10.1590/2317-488920220220005>
- MAGALHÃES, Celina Cenni de Castro. Modelo hidrogeológico de fluxo do flanco leste do Sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero – MG): caracterização, impactos e perspectivas futuras para o Aquífero Cauê. 2023. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/54865>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- MELO, M. C. ; FORMIGA-JOHNSON, R. M. ; AZEVEDO, J. P. S. ; NASCIMENTO, N. O. ; MACHADO, F. L. V. ; PACHECO, F. A. L. ; FERNANDES, L. F. S. A raw water security risk model for urban supply based on failure mode analysis. *Journal of Hydrology*, v. 593, 125843, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125843>

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCTI. Supercomputador Jaci começa a operar no enfrentamento a desafios climáticos brasileiros. Brasília: MCTI, 11 dez. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/12/supercomputador-jaci-comeca-a-operar-no-enfrentamento-a-desafios-climaticos-brasileiros>. Acesso em: 15 jun. 2026.

MOURÃO, M. A. A. Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê: subsídios para a gestão de recursos hídricos no Quadrilátero Ferrífero. 2007. 297 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian cerrado. *Ecohydrology*, v. 10, e1759, 2017.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian cerrado. *Ecohydrology*, v. 10, e1759, 2017.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 19, p. 2899-2910, 2015.

PACHECO NETO, W. M. ; MAGALHÃES, C. C. de C. ; DE PAULA, R. S. ; MELO, M. C. de; GUIGUER, N. ; PEREIRA, B. A. ; GALVÃO, P. Numerical modeling of the Cauê Aquifer in the ferruginous geosystems of the Moeda Syncline (Iron Quadrangle, Brazil): Assessing regional impacts of groundwater pumping and predicting future drawdown trends. *Hydrogeology Journal*, v. 34, p. 1093-1110, 2026. <https://doi.org/10.1007/s10040-026-03026-1>

RODELL, M. et al. Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, v. 557, p. 651-659, 2018.

RODRIGUES, A. F. ; BRENTAN, B. M. ; OTTONI, M. V. ; AMORIM, J. S. ; MOURÃO, M. A. A. ; CURTI, N. ; AVANZI, J. C. ; DE MELLO, C. R. Has unsustainable groundwater use induced low flow regimes in the Urucuia Aquifer System? An urgent call for integrated water management. *Journal of Environmental Management*, v. 370, 122979, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122979>

SOARES, I. L. O. A Geração de Conflitos pelo Uso da Água na Bacia do Rio Paracatu, Noroeste de Minas Gerais, Brasil. *Revista ARACÊ*, v. 7, n. 4, p. 18875-18892, 2025. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/download/4491/6029/17455>. Acesso em: 11 jun. 2026.

UCHÔA, J. G. S. M. ; OLIVEIRA, P. T. S. ; BALLARIN, A. S. ; MEIRA NETO, A. A. ; GASTMANS, D. ; JASECHKO, S. ; FAN, Y. ; WENDLAND, E. C. Widespread potential for streamflow leakage across Brazil. *Nature Communications*, v. 15, 10211, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54370-3>

—

Data de emissão: 15 de junho de 2026

Nota Técnica elaborada com base nos documentos científicos referenciados.