

# Influência do Uso e Cobertura da Terra no Ciclo da Água em Ouro Preto, MG: Contribuições para a Gestão dos Recursos Hídricos

**Influence of Land Use and Land Cover on the Water Cycle in Ouro Preto, MG: Contributions to Water Resource Management**

**Lucas Mardones Gaião<sup>1</sup>** 

**Daniela Arcanjo Paiola Ferreira<sup>2</sup>** 

**Roosevelt Heldt Júnior<sup>3</sup>** 

**Paulo de Tarso Amorim Castro<sup>4</sup>** 

## Palavras-chave

Modelagem Hidrológica  
Sistema de Informação Geográfica  
Balânco Hídrico  
Escoamento Superficial  
Recarga de Aquíferos

## Resumo

A água é um elemento essencial à vida e a sua gestão nos territórios é necessária para garantir que seja universalmente acessível e para manter a sua qualidade e quantidade. Intervenções mal planejadas na paisagem intensificam problemas relacionados à erosão, assoreamento, enchentes, deslizamentos e escassez de água potável. Entre os processos essenciais para a gestão dos recursos hídricos destaca-se o escoamento superficial e a infiltração, que são influenciados diretamente pelas modificações no uso e cobertura da terra. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi analisar os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra ocorridas entre 2002 e 2022 sobre as taxas de escoamento superficial e de infiltração no município de Ouro Preto, MG. Inicialmente, foi estimado o coeficiente de escoamento com base nos mapas de declividade, classes de solo e uso e cobertura da terra de 2002 e 2022. Posteriormente, foi elaborado o mapa de escoamento multiplicando o coeficiente pela precipitação média anual. Finalmente, foi elaborado o mapa de infiltração utilizando o cálculo do saldo de água, subtraindo o escoamento e a evapotranspiração. O geoprocessamento foi feito em plataforma SIG com dados de sensoriamento remoto utilizando o software QGIS. Os resultados indicam aumento da taxa de escoamento superficial e diminuição da infiltração, principalmente na porção oeste, norte e central do município. Situação preocupante considerando que as menores taxas de infiltração estão sobre aquíferos de grande potencial, prejudicando a sua recarga. O aumento das taxas de escoamento intensifica os problemas de erosão, situação especialmente alarmante na região central, onde o solo é propício para a ocorrência de voçorocas.

## Keywords

Hydrological Modeling  
Geographic Information System  
Water Balance  
Surface Runoff  
Aquifer Recharge

## Abstract

Water is an essential element for life, and its territorial management is crucial to ensure universal access while maintaining both quality and quantity. Poorly planned landscape interventions intensify problems such as erosion, siltation, flooding, landslides, and potable water scarcity. Among the key processes for water resource management, surface runoff and infiltration stand out, both directly influenced by land use and land cover (LULC) changes. This study aimed to evaluate the impacts of LULC modifications between 2002 and 2022 on surface runoff and infiltration rates in the municipality of Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. Runoff coefficients were first estimated based on slope maps, soil classes, and LULC for 2002 and 2022. Subsequently, runoff maps were generated by multiplying these coefficients by average precipitation. Infiltration maps were then derived using the water balance method, subtracting runoff and evapotranspiration. Geoprocessing was conducted in a GIS environment using remote sensing data within the QGIS platform. Results indicate an increase in surface runoff and a decrease in infiltration, especially in the western, northern, and central portions of the municipality. This is concerning, as the lowest infiltration rates coincide with high-potential aquifers, threatening their recharge. Furthermore, the increase in runoff exacerbates erosion risks, particularly in the central region, where soils are highly susceptible to gully formation.

<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. [luca.gaiao@aluno.ufop.edu.br](mailto:luca.gaiao@aluno.ufop.edu.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. [daniela.arcanjo@aluno.ufop.edu.br](mailto:daniela.arcanjo@aluno.ufop.edu.br)

<sup>3</sup>Instituto Federal do Sul de Minas – IFSULDEMINAS, Poços de Caldas, MG, Brasil. [roosevelt.heldt@ifsuldeminas.edu.br](mailto:roosevelt.heldt@ifsuldeminas.edu.br)

<sup>4</sup>Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil. [paulo\\_de\\_tarso@ufop.edu.br](mailto:paulo_de_tarso@ufop.edu.br)

## INTRODUÇÃO

Apesar da grande disponibilidade de recursos hídricos no Brasil, sua gestão é ineficiente e conflituosa (Peixoto *et al.*, 2021). Grande parte dessa água é utilizada na produção de *commodities*, como o minério de ferro, que em 2021 liderou as exportações nacionais, ultrapassando US\$ 44,6 bilhões, dos quais US\$ 18,2 bilhões vieram de Minas Gerais (Ministério da Economia, 2022). No Quadrilátero Ferrífero (QF), principal região produtora de minério de ferro de Minas Gerais, a gestão hídrica é complexa, e o conflito com a mineração agravou a situação, visto que as formações geológicas que abrigam as principais jazidas também contêm aquíferos fundamentais para a segurança hídrica regional (Souza, 2021; Miguel; Campos, 2024). Neste contexto, o município de Ouro Preto, situado na porção sudeste do QF, vivencia um dilema complexo ao tentar conciliar a expansão urbana e a atividade mineradora com a conservação de seus recursos hídricos.

As mudanças no uso e cobertura da terra afetam o ciclo hidrológico, modificando os padrões de fluxo e as propriedades hidráulicas do solo, o que impacta as taxas de escoamento e infiltração (Mahmoud; Alazba, 2015; Savary *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2021). Tais processos hidrológicos são cruciais, pois influenciam as taxas de erosão e assoreamento, a produtividade agrícola (Quinton; Catt, 2006), a ocorrência de inundações (Wheater; Evans, 2009), a conservação das reservas de água subterrânea e a vazão dos cursos d'água (Jukić; Denić-Jukić, 2009). Dessa forma, análises que estimam os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre as taxas de escoamento superficial e infiltração são fundamentais para a gestão dos recursos hídricos (Delgado *et al.*, 2020; Frey *et al.*, 2021).

Diversos métodos e modelos numéricos têm sido desenvolvidos para estimar o escoamento superficial e a infiltração (Scanlon *et al.*, 2002). A elevada demanda de dados espaciais e tempo de processamento levou ao desenvolvimento de tabelas e fórmulas simplificadas, amplamente utilizadas em regiões com escassez de dados ou em análises de grande escala, que estimam o coeficiente de escoamento com base na inclinação, na permeabilidade do solo e no uso e cobertura da terra (D'Alberto; Lucianetti, 2019). Outros modelos integram o balanço hídrico com base nos dados de escoamento superficial, precipitação e evapotranspiração para estimar a infiltração (Costa *et al.*, 2019; Galvão *et al.*, 2018). Esses modelos passaram a incorporar dados de sensoriamento remoto e processamento

em Sistema de Informações Geográficas (SIG), dada a ampla disponibilidade de dados espaciais, espectrais, radiométricos e temporais (Thakur *et al.*, 2016).

No entanto, apesar da existência de diversos estudos de modelagem hidrológica, observa-se uma lacuna importante na literatura no que tange à análise de séries históricas longas no Quadrilátero Ferrífero com foco específico na escala municipal. Essa abordagem é essencial, pois é no nível municipal que muitas das decisões de ordenamento territorial são tomadas. Dessa forma, o presente artigo teve por objetivo analisar como as mudanças no uso e cobertura da terra ocorridas entre 2002 e 2022 afetaram as taxas de escoamento superficial e infiltração no município de Ouro Preto, MG. A hipótese levantada é que a supressão da cobertura vegetal nativa em favor da expansão urbana e das áreas de mineração resultou em um aumento significativo do escoamento superficial e na consequente redução da capacidade de infiltração, comprometendo a resiliência hídrica local. Os resultados visam fornecer subsídios técnicos para uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos na região.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização da área de estudo

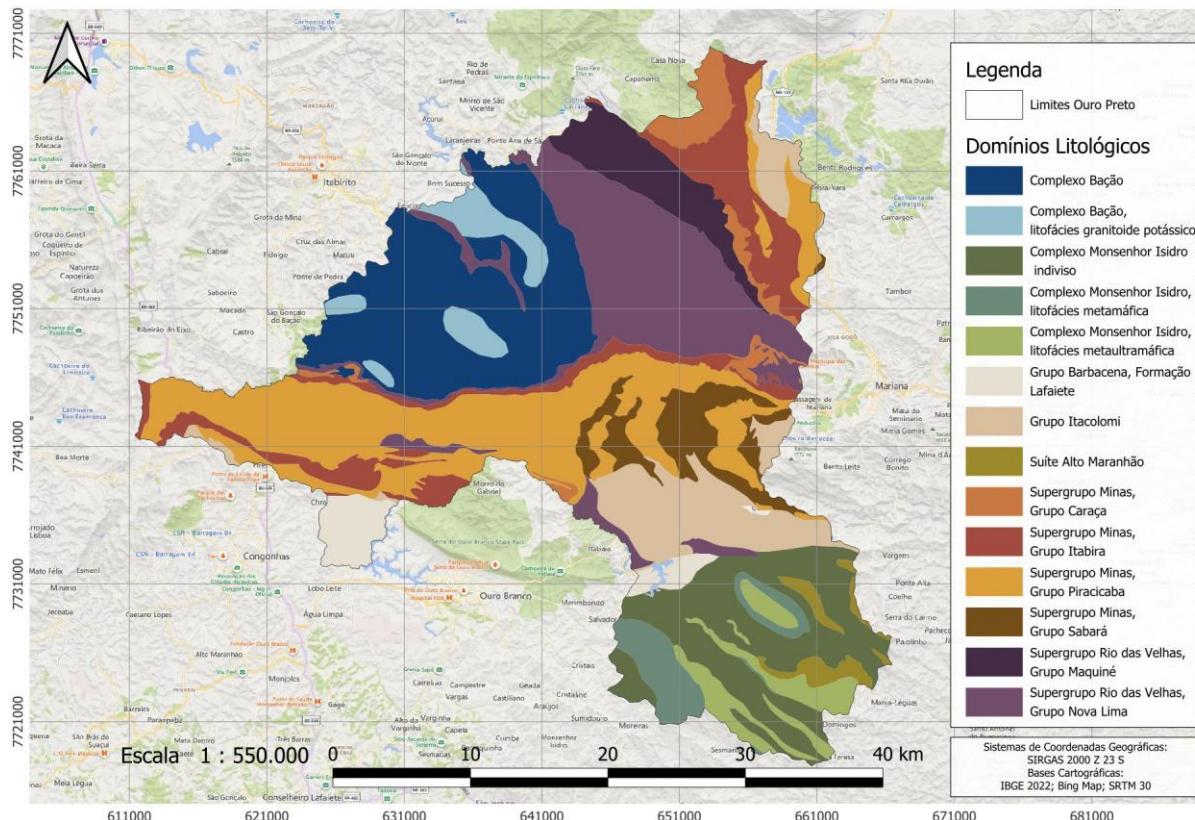
Ouro Preto está situado no extremo sudeste do Quadrilátero Ferrífero e do Cráton São Francisco (Almeida, 1977). Possui uma área de 1.245 km<sup>2</sup> que abrange 13 distritos e aproximadamente 75 mil habitantes, com a área urbana representando 1,5% do território (18,8 km<sup>2</sup>) em 2022 (Souza *et al.*, 2020; IBGE, 2022). Localiza-se em uma região de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, onde predominam as florestas estacionais e os campos rupestres (Messias *et al.*, 2015). Segundo a classificação de Köppen e Geiger o clima é Cwb (subtropical de altitude), com inverno seco e estação chuvosa de novembro a março (Nimer, 1989).

O município apresenta geologia complexa, composta por quatro conjuntos litoestratigráficos principais: Complexo Metamórfico do Bação, de embasamento granito-gnáissicos de idade arqueana; Supergrupo Rio das Velhas, sequência vulcano-sedimentar arqueana do tipo “greenstone belt”; Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi, sequências metassedimentares do paleo e mesoproterozóico (Ruchkys, 2007; Varajão *et al.*,

2009). Ao sul foram cartografadas as seguintes unidades: Unidades Metamáficas e

Metaultramáficas, Corpo Monsenhor Isidro e Suíte Alto Maranhão (Figura 1).

Figura 1 - Mapa Geológico do Município de Ouro Preto, MG

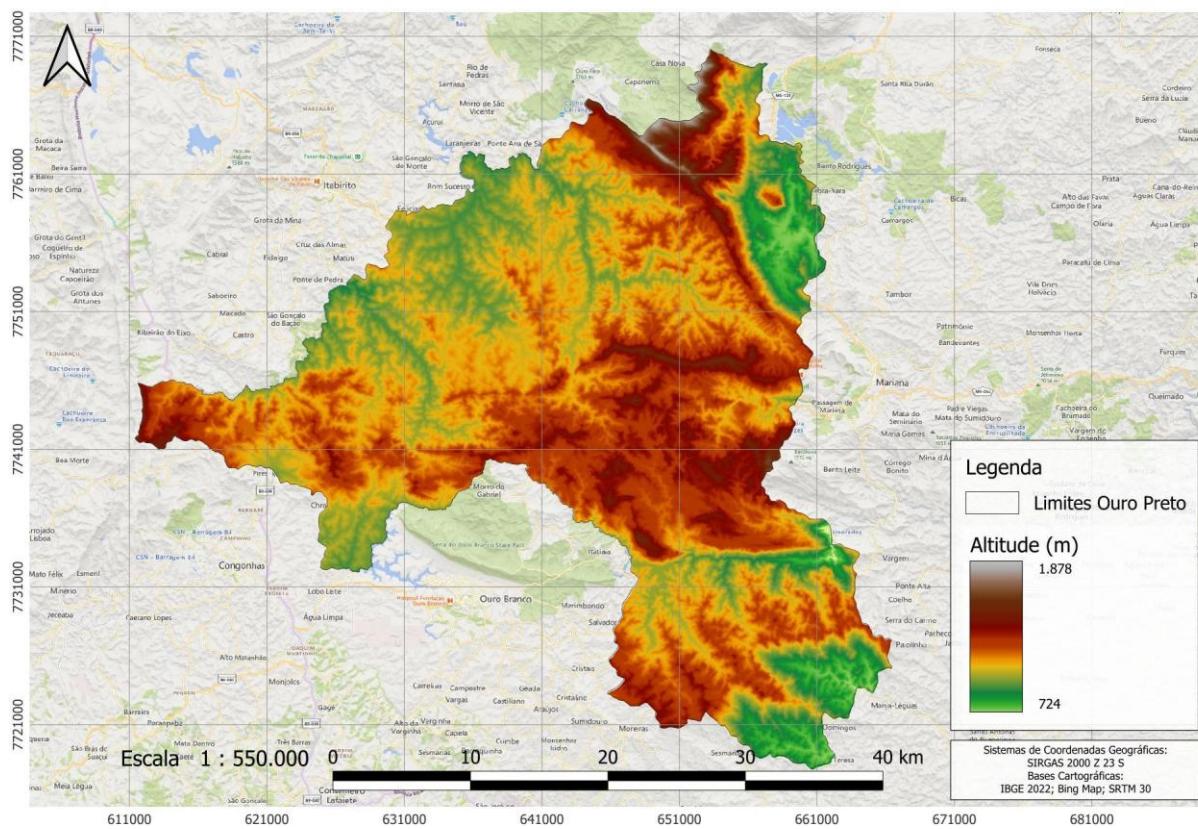


Fonte: CPRM (2014). Elaborado pelos autores (2025).

Tal complexidade litológica reflete-se em um relevo acidentado, com altitudes que variam entre 666 e 1.898 metros (Figura 2). As áreas elevadas são compostas por itabiritos e quartzitos do Supergrupo Minas e do Grupo Itacolomi; as regiões intermediárias são

constituídas em sua maioria por xistos, filitos e quartzitos friáveis dos supergrupos Minas e Rio das Velhas; e as regiões mais baixas por gnaisses (Varajão *et al.*, 2009).

Figura 2 - Mapa hipsométrico do município de Ouro Preto, MG

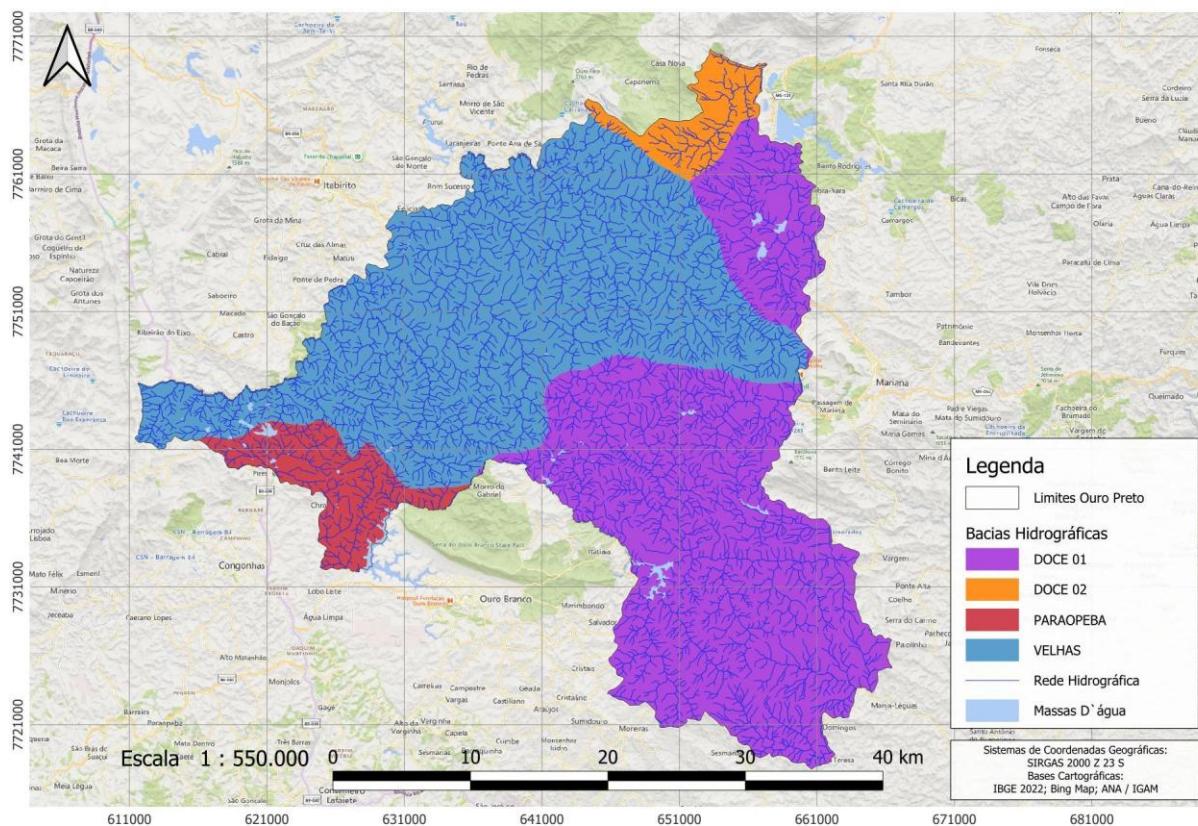


Fonte: SRTM (Farr *et al.*, 2007). Elaborado pelos autores (2025).

O território é drenado por duas grandes bacias, a do Rio São Francisco — que abrange as bacias do Rio das Velhas e do Rio Paraopeba — e a do Rio Doce — que abrange as bacias do Rio Piranga e do Rio Piracicaba (Figura 3). A heterogeneidade geológica e geomorfológica regional favorece a ocorrência de solos com significativa variação de profundidade, textura

e estrutura, que foram agrupados em seis classes no mapa de solos de Minas Gerais: Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho, Argissolo Vermelho, Neossolo Litólico, Cambissolo Háplico e Afloramento de Rocha (UFV *et al.*, 2010).

Figura 3 - Mapa das Bacias Hidrográficas do município de Ouro Preto, MG



Fonte: IGAM (2023). Elaborado pelos autores (2025).

### Dados de entrada e metodologia de modelagem

O escoamento superficial foi calculado multiplicando-se a pluviosidade média anual por um coeficiente de escoamento, estimado via álgebra de mapas a partir da integração de dados de declividade, permeabilidade do solo e uso da terra. A infiltração foi obtida pela equação de balanço hídrico (Rushbrook; Pugh, 1999), deduzindo-se o escoamento superficial e a evapotranspiração da precipitação total.

### Coeficiente de escoamento superficial

Diversos métodos de cálculo do escoamento superficial baseados em dados geomorfológicos, pedológicos e de uso e cobertura da terra foram organizados em uma matriz de referência (Tabela 1). Utilizaram-se os coeficientes propostos por Kenessey (1930) e Barazzuoli *et al.*, (1989), selecionados por compreenderem faixas de declividade mais elevadas e adequadas ao relevo montanhoso da região, e por Liu (2004), que abrange as texturas de solo encontradas na área. Para definir os coeficientes em áreas urbanas, foram adotados os parâmetros da ASCE e WPCF (1986) e de Rahaman (2021).

**Tabela 1** - Coeficientes de escoamento superficial para diferentes classes de uso e cobertura da terra, de inclinação e de permeabilidade do solo

Uso e Cobertura da Terra	Inclinação	Permeabilidade do solo			
		Alta	Média	Baixa	Muito baixa
<b>Floresta/Savana/Silvicultura</b>					
Plano:	< 3,5%	0,10	0,20	0,30	0,40
Levemente inclinado.:	3,5-10%	0,14	0,24	0,34	0,44
Inclinado:	10-35%	0,20	0,30	0,40	0,50
Muito inclinado:	35%	0,32	0,42	0,52	0,62
<b>Pastagem/Campestre</b>					
Plano:	< 3,5%	0,20	0,30	0,40	0,50
Levemente inclinado:	3,5-10%	0,24	0,34	0,44	0,54
Inclinado:	10-35%	0,30	0,40	0,50	0,60
Muito inclinado:	35%	0,42	0,52	0,62	0,72
<b>Agricultura</b>					
Plano:	< 3,5%	0,30	0,40	0,50	0,60
Levemente inclinado:	3,5-10%	0,34	0,44	0,54	0,64
Inclinado:	10-35%	0,40	0,50	0,60	0,70
Muito Inclinado:	35%	0,52	0,62	0,72	0,82
<b>Solo exposto/mineração</b>					
Plano:	< 3,5%	0,40	0,50	0,60	0,70
Levemente inclinado:	3,5-10%	0,44	0,54	0,64	0,74
Inclinado:	10-35%	0,50	0,60	0,70	0,80
Muito Inclinado:	35%	0,62	0,72	0,82	0,92
<b>Área urbana</b>					
Plano:	< 3,5%	0,70	0,70	0,70	0,70
Levemente inclinado:	3,5-10%	0,74	0,74	0,74	0,74
Inclinado:	10-35%	0,82	0,82	0,82	0,82
Muito Inclinado:	> 35%	0,95	0,95	0,95	0,95

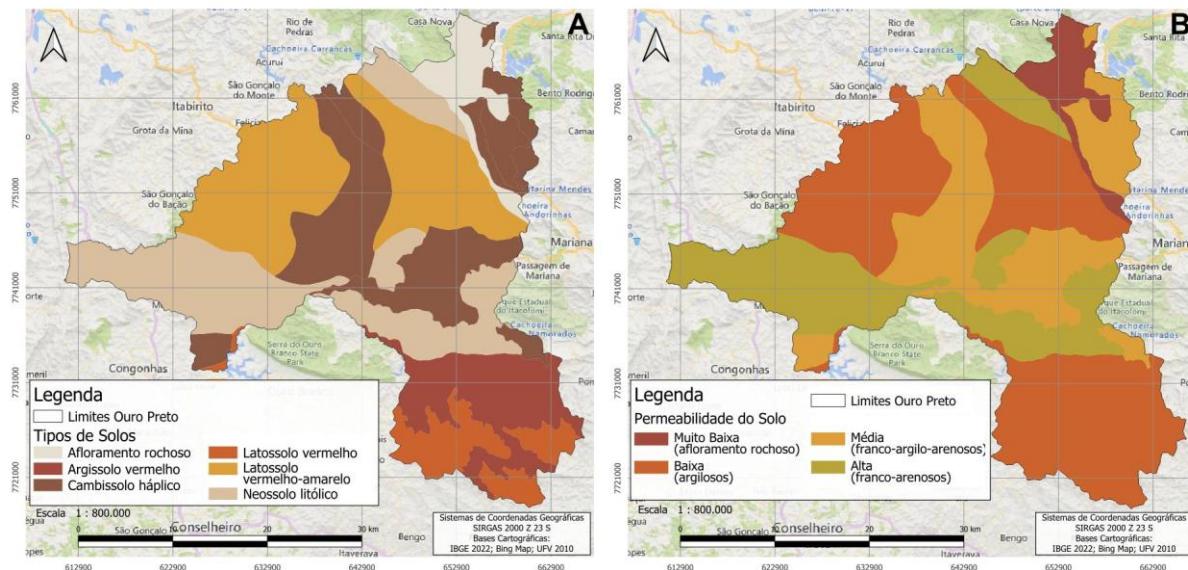
Fonte: Kenessey (1930); Barfield *et al.*, (1983); ASCE e WPCF (1986); Barazzuoli *et al.*, (1989); Liu (2004); Rahaman (2021). Elaborado pelos autores (2025).

### Mapa de permeabilidade dos solos

As seis classes de solo mapeadas pela UFV *et al.*, (2010) (Figura 4A) foram reclassificadas quanto à permeabilidade (Figura 4B). Diante da ausência de dados primários de condutividade hidráulica, elaborou-se um banco de dados com amostras de solos obtidas em pesquisas regionais (Andrade *et al.*, 2012; Costa *et al.*, 2014; Bonna, 2011; Vale, 2013; Souza, 2013). Estas amostras foram plotadas no diagrama triangular de classes texturais (Lemos; Santos, 1996) para determinar a textura predominante de cada classe de solo. Seguindo a metodologia

de Liu (2004), solos majoritariamente franco-arenosos foram considerados de alta permeabilidade; franco-argilo-arenosos, de média permeabilidade; e argilosos, de baixa permeabilidade. Os afloramentos rochosos foram classificados como de muito baixa permeabilidade, devido à frequente ocorrência de fragmentos rochosos e capas lateríticas em mosaicos junto a Neossolos e campos rupestres (Messias *et al.*, 2013). Esta classificação valorizou a maior permeabilidade dos Neossolos e Cambissolos e, consequentemente, das áreas de maior elevação, que abrigam parte significativa das nascentes.

Figura 4 - A - Solos do município de Ouro Preto, MG. B - Mapa de permeabilidade dos solos do município de Ouro Preto, MG



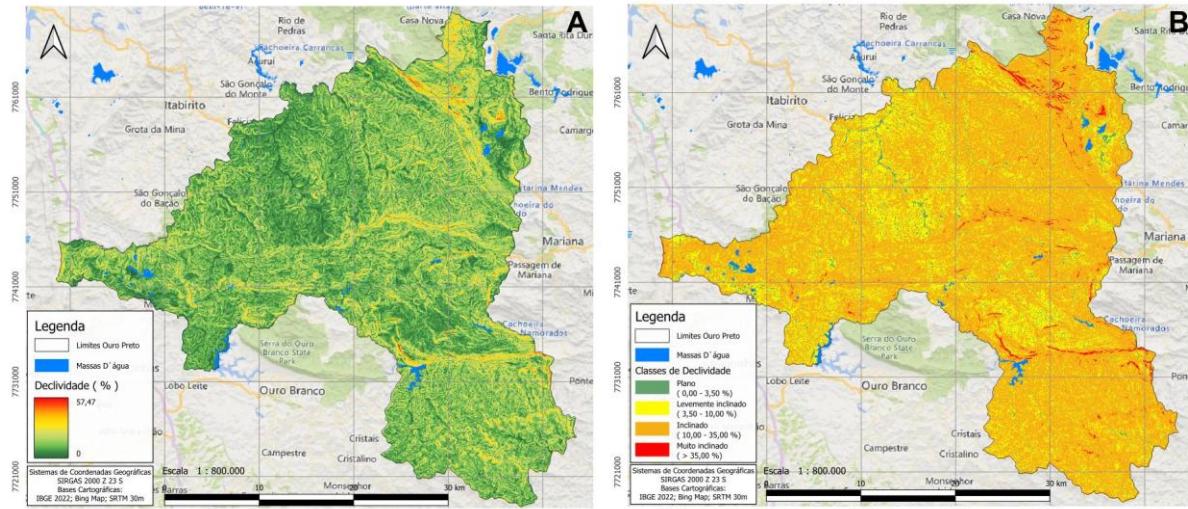
Fonte: UFV *et al.*, (2010). Elaborado pelos autores (2025).

### Mapa de declividade por modelo digital de altitude

O mapa de declividade (Figura 5A) foi derivado do Modelo Digital de Elevação SRTM V3 (resolução de 30 m), posteriormente

reclassificado em quatro intervalos conforme Barazzuoli *et al.*, (1989): plano (<3,5%); levemente inclinado (3,5%–10%); inclinado (10%–35%); e muito inclinado (>35%) (Figura 5B).

Figura 5 - A - Declividade (%) do município de Ouro Preto, MG. B - Classes de declividade do município de Ouro Preto, MG



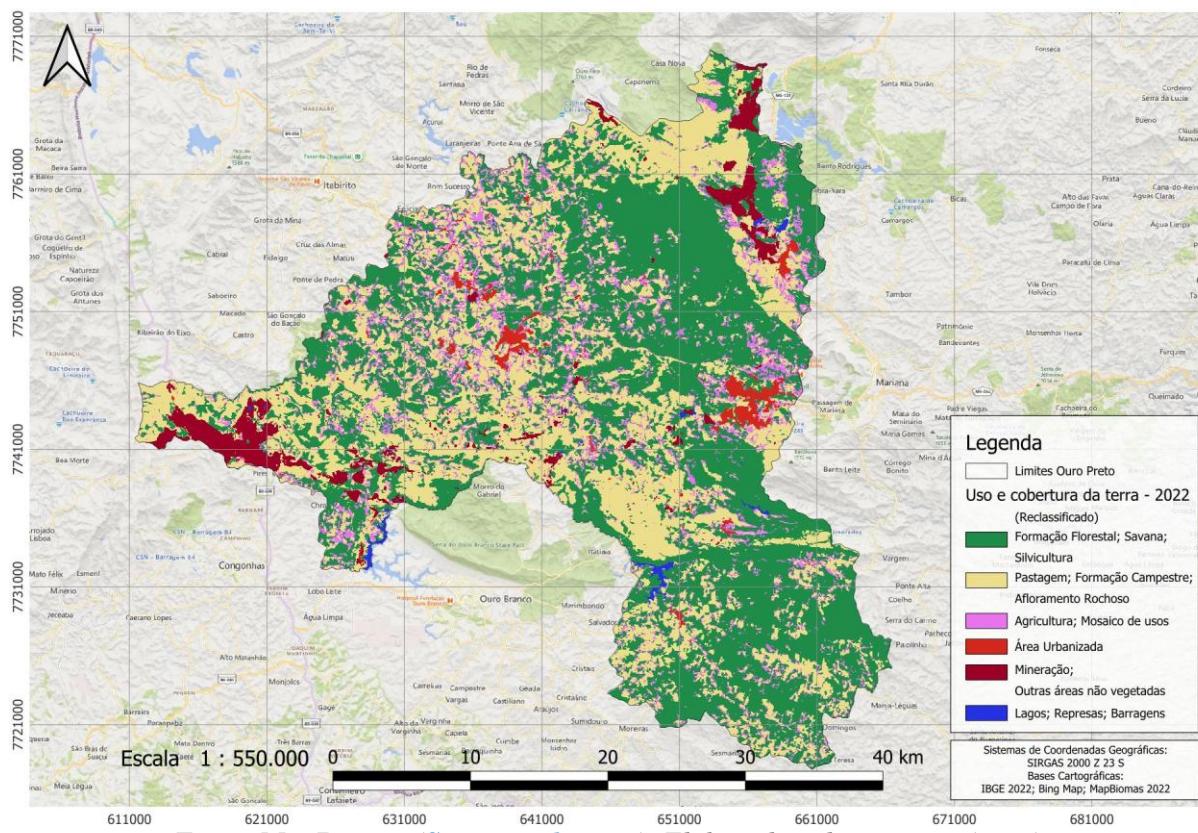
Fonte: SRTM (Farr *et al.*, 2007). Elaborado pelos autores (2025).

### Mapa de uso e cobertura da terra de 2002 e 2022

Utilizaram-se dados da Coleção 7 do MapBiomass (Landsat 5, 30 m) para os anos de 2002 e 2022. As classes originais foram reagrupadas em cinco categorias, de acordo com a capacidade de

escoamento superficial (Liu, 2004): Floresta/Savana/Silvicultura (escoamento muito baixo); Pastagem/Campestre (escoamento baixo); Agricultura (escoamento médio); Solo exposto/Mineração (escoamento alto); e Área urbanizada (escoamento muito alto) (Figura 6).

Figura 6 - Classes de uso e cobertura da terra de acordo com a capacidade de escoamento superficial do município de Ouro Preto, MG, ano de 2022



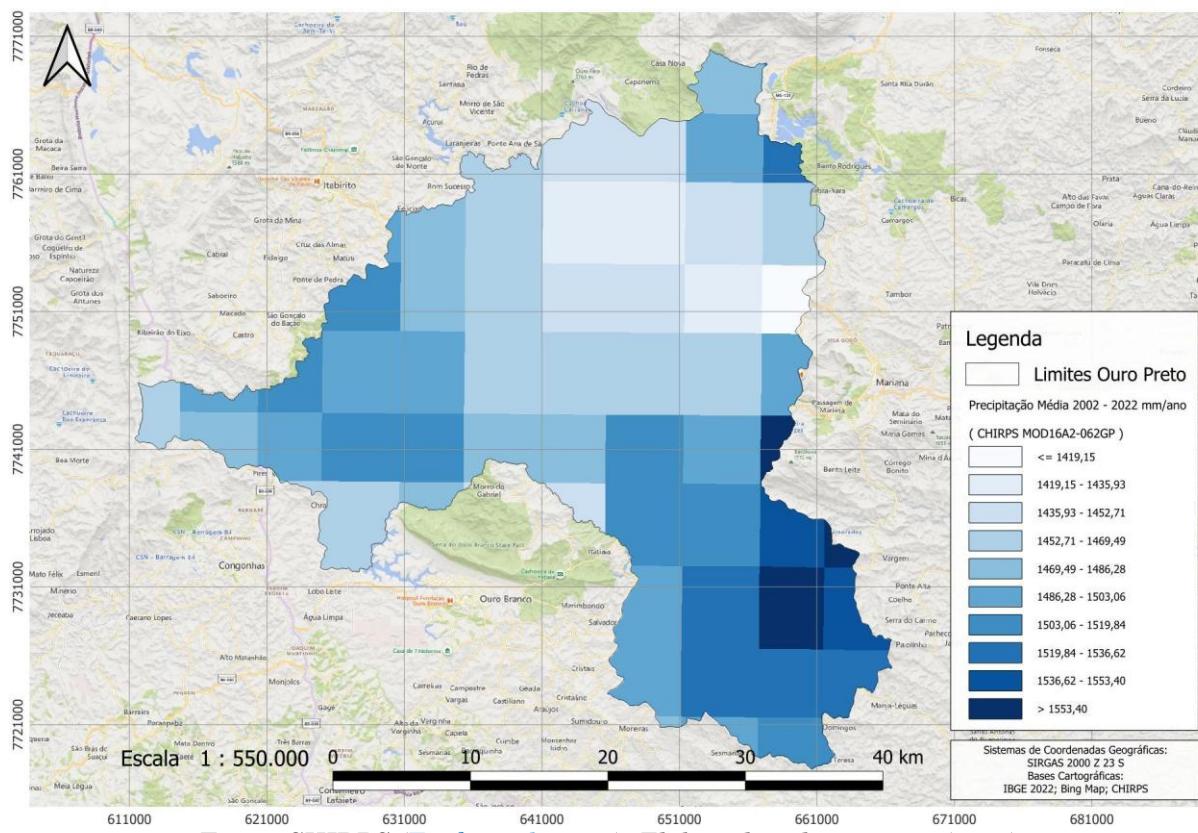
Fonte: MapBiomas (Souza *et al.*, 2020). Elaborado pelos autores (2025).

### Mapa de precipitação

O mapa de precipitação utilizou a série histórica do Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), que integra imagens de satélite (0,05°) com dados de

estações meteorológicas (Funk *et al.*, 2015). Foi calculada a média anual da série temporal (2002 a 2022), seguida de reamostragem para 30 m, procedimento necessário para evitar a perda de detalhamento geomorfológico e urbano e viabilizar a álgebra de mapas (Figura 7).

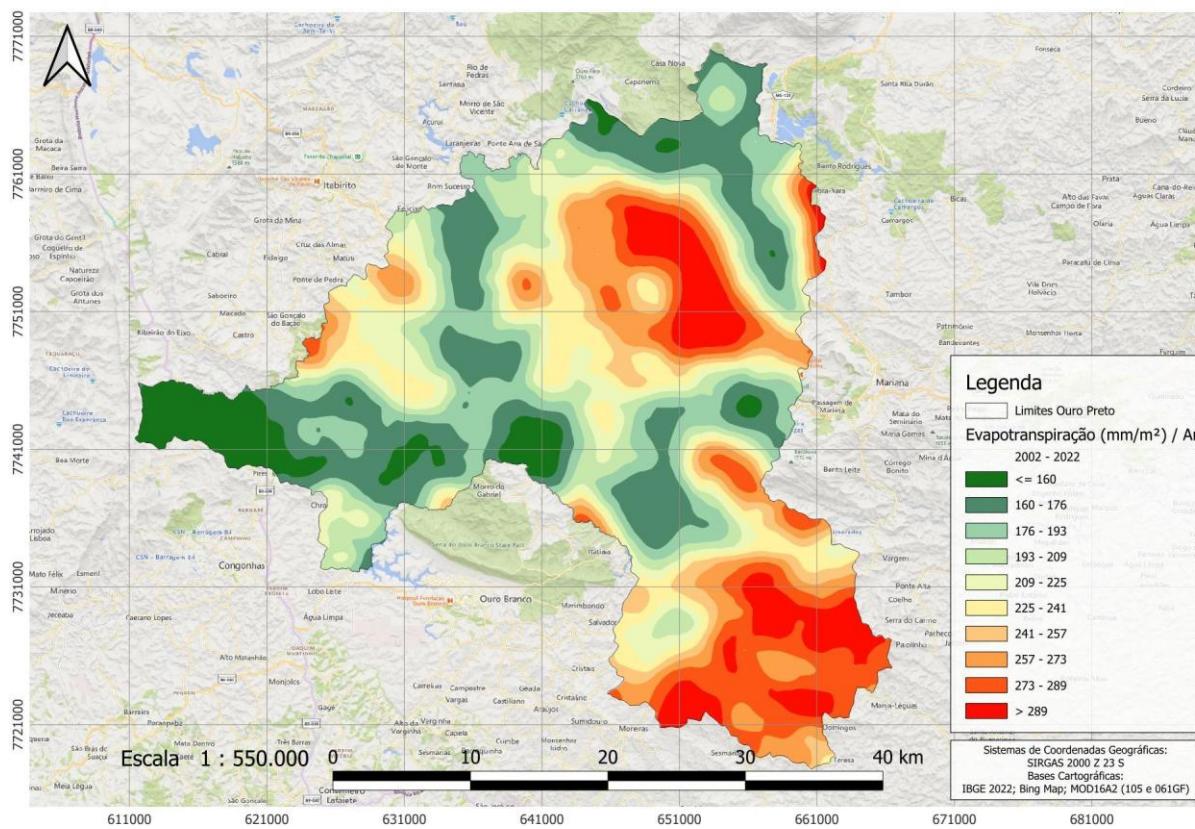
Figura 7 - Mapa de pluviosidade média anual (2002 a 2022) do município de Ouro Preto, MG



Fonte: CHIRPS (Funk *et al.*, 2015). Elaborado pelos autores (2025).

(Running *et al.*, 2021). O modelo foi selecionado por apresentar maior detalhamento espacial (500 m) e melhor distinção do uso da terra em comparação ao FLDAS (Silva *et al.*, 2021). Obteve-se a evapotranspiração média da série temporal (2002 a 2022), com posterior reamostragem para 30 m (Figura 8).

Figura 8 - Média anual de evapotranspiração (2002 a 2022) do município de Ouro Preto, MG



Fonte: Running *et al.*, (2021). Elaborado pelos autores (2025).

### Mapa de escoamento e de infiltração

As camadas de permeabilidade dos solos, inclinação e uso e cobertura da terra foram combinadas conforme a Tabela 1 para determinar o coeficiente de escoamento superficial de cada pixel. Este coeficiente foi multiplicado pela precipitação média anual, gerando os mapas de escoamento superficial (mm/ano) para os cenários de 2002 e 2022.

A infiltração foi estimada adaptando-se a equação de balanço hídrico de Rushbrook e Pugh (1999):

$$I = P - ET - R$$

Onde:  $I$  = volume infiltrado (abrangendo a umidade armazenada no solo e a água percolada);  $P$  = volume precipitado;  $ET$  = volume evapotranspirado; e  $R$  = volume escoado superficialmente.

### Limitações do Método

Ressalta-se que o modelo adota simplificações necessárias à escala regional analisada. Optou-se por considerar a infiltração como um todo, incluindo a água armazenada no solo e percolada, devido à heterogeneidade pedológica e à falta de dados especializados sobre as

características hidráulicas dos solos locais, lacuna que também exigiu a generalização das classes de permeabilidade com base em dados secundários. Outra limitação reside na ausência de validação de campo, inviabilizada pela inexistência de hidrogramas históricos nas microbacias e por restrições operacionais para campanhas de medição in situ. O modelo, portanto, propõe uma representação simplificada da realidade para prever impactos de gestão territorial, indicando tendências espaciais e não valores hidrológicos absolutos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise integrada das mudanças de uso da terra e seus reflexos hidrológicos entre 2002 e 2022 demonstra impactos quantitativos relevantes no ciclo da água em Ouro Preto.

### Uso e Cobertura da Terra

Os dados do MapBiomas (2002–2022) evidenciam uma transformação significativa na paisagem de Ouro Preto (Souza *et al.*, 2020). Destaca-se a redução da cobertura florestal nativa, parte considerável provavelmente

convertida em monocultivos de eucalipto, como aponta o aumento expressivo de 255% das áreas de silvicultura (Tabela 2). A expansão de 40% nas classes de uso antrópico intensivo (mineração e urbano) afeta diretamente o balanço hídrico local. Tais mudanças não ocorrem de forma homogênea, mas concentram-se em vetores de pressão econômica: o eixo

minerário norte-oeste (Antônio Pereira/Miguel Burnier) e o eixo de urbanização central no entorno da BR-356 (Cachoeira do Campo/Amarantina). Essa dinâmica confirma a pressão da atividade extrativa e do adensamento populacional sobre o território, promovendo a impermeabilização de zonas de recarga potenciais.

**Tabela 2** - Classes de uso e cobertura da terra do município de Ouro Preto, MG, área ocupada e variação dos anos de 2002 e 2022, com base nos dados do MapBiomas

Uso e Cobertura da Terra	Área 2002 km <sup>2</sup> (%)	Área 2022 km <sup>2</sup> (%)	Variação (%)
Formação Florestal	583,78 (46,9%)	556,18 (44,6%)	-5
Formação Savânica	1,68 (0,13%)	1,87 (0,15%)	11
Silvicultura	14,90 (1,2%)	52,90 (4,25%)	255
Formação Campestre	203,23 (16,3%)	222,40 (17,9%)	9
Pastagem	209,35 (16,8%)	167,60 (13,5%)	-20
Mosaico de Agricultura e Pastagem	127,72 (10,3%)	119,30 (9,6%)	-7
Infraestrutura Urbana	13,39 (1,1%)	18,79 (1,5%)	40
Outras Áreas Não Vegetadas	6,50 (0,5%)	6,33 (0,5%)	-3
Campo Rupestre	37,68 (3%)	37,93 (3%)	1
Mineração	38,77 (3,1%)	54,27 (4,4%)	40
Rios, Lagos e Represas	4,43 (0,36%)	4,24 (0,34%)	-4
Agricultura	0,07 (0,01%)	0,61 (0,05%)	780
Café	4,27 (0,34%)	3,23 (0,26%)	-24
Outros Cultivos Perenes	0,11 (0,01%)	0,24 (0,02%)	118

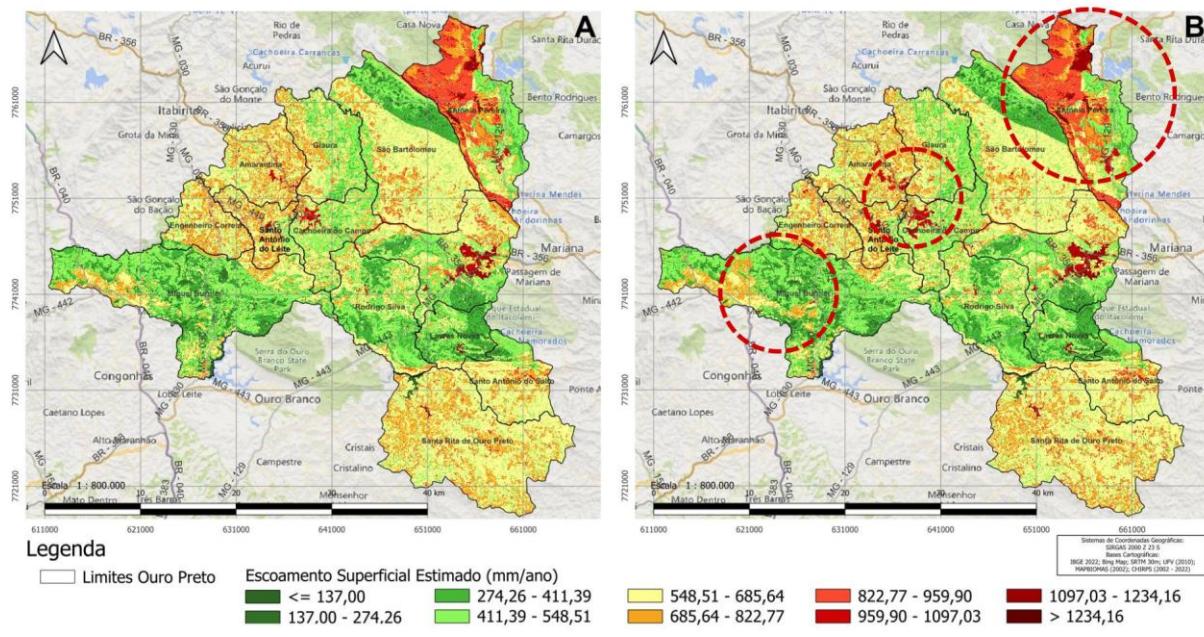
Fonte: MapBiomas ([Souza \*et al.\*, 2020](#)). Elaborado pelos autores (2025).

### *Escoamento Superficial*

O aumento das taxas de escoamento superficial valida a hipótese inicial deste estudo, de que a alteração da cobertura da terra resultou em um incremento no escoamento superficial entre 2002 e 2022 (Figura 9). Os mapas evidenciam zonas críticas: na porção norte e oeste (Antônio Pereira e Miguel Burnier), onde o aumento do escoamento está diretamente associado à exposição do solo pela mineração; já na porção central (Cachoeira do Campo e Amarantina), o vetor principal é a urbanização. Os valores

estimados de escoamento superficial são altos se comparados a outros estudos ([Mahmoud; Alazba, 2015](#); [Tilahun; Merkel, 2009](#)), provavelmente em função do relevo majoritariamente inclinado e das altas taxas de precipitação. Embora a resolução de 30 m e a ausência de calibração *in situ* imponham limitações à precisão dos valores estimados, a tendência de aumento é clara e indica o risco de intensificação de processos erosivos e voçorocamento, fenômenos já recorrentes em virtude das características do solo na região ([Bonna, 2011](#); [Pedrosa, 2013](#)).

Figura 9 - A - Escoamento superficial no município de Ouro Preto, MG, em mm/ano no ano de 2002, e em B - no ano de 2022



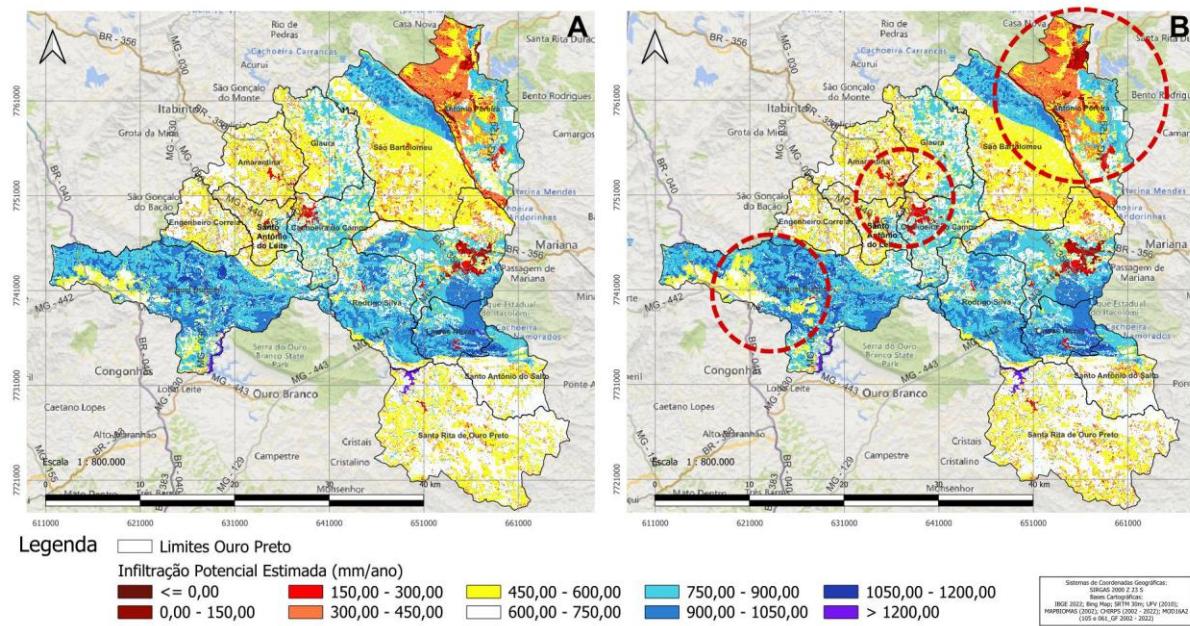
Fonte: Os autores (2025).

### Infiltração

A redução da infiltração estimada (Figura 10) expõe um conflito socioeconômico e ambiental latente no Quadrilátero Ferrífero: as formações geológicas de maior interesse mineral coincidem com as principais reservas hídricas subterrâneas (Souza, 2021). A área norte, onde a infiltração foi especialmente baixa, abriga importantes aquíferos do município: o Grupo Itabira que, especialmente na Formação Cauê, apresenta elevada capacidade de armazenamento e condutividade (Mourão, 2007); os Grupos Piracicaba e Sabará, que

possuem alta porosidade, permeabilidade e coeficiente de armazenamento; e o Grupo Itacolomi, formado por aquíferos fraturados que normalmente apresentam coeficientes de transmissividade elevados (Ferreira; Bacellar, 2010). Situação semelhante em relação ao potencial aquífero ocorre na região oeste do município, onde também houve uma redução notável na taxa de infiltração (Figura 11). Outras áreas com baixa a média infiltração incluem a porção centro-leste, localizada principalmente sobre rochas dos Grupos Piracicaba e Sabará, região de captação importante para o abastecimento da cidade.

Figura 10 - A - Infiltração estimada no município de Ouro Preto, MG, em mm/ano no ano de 2002, e em B - no ano de 2022

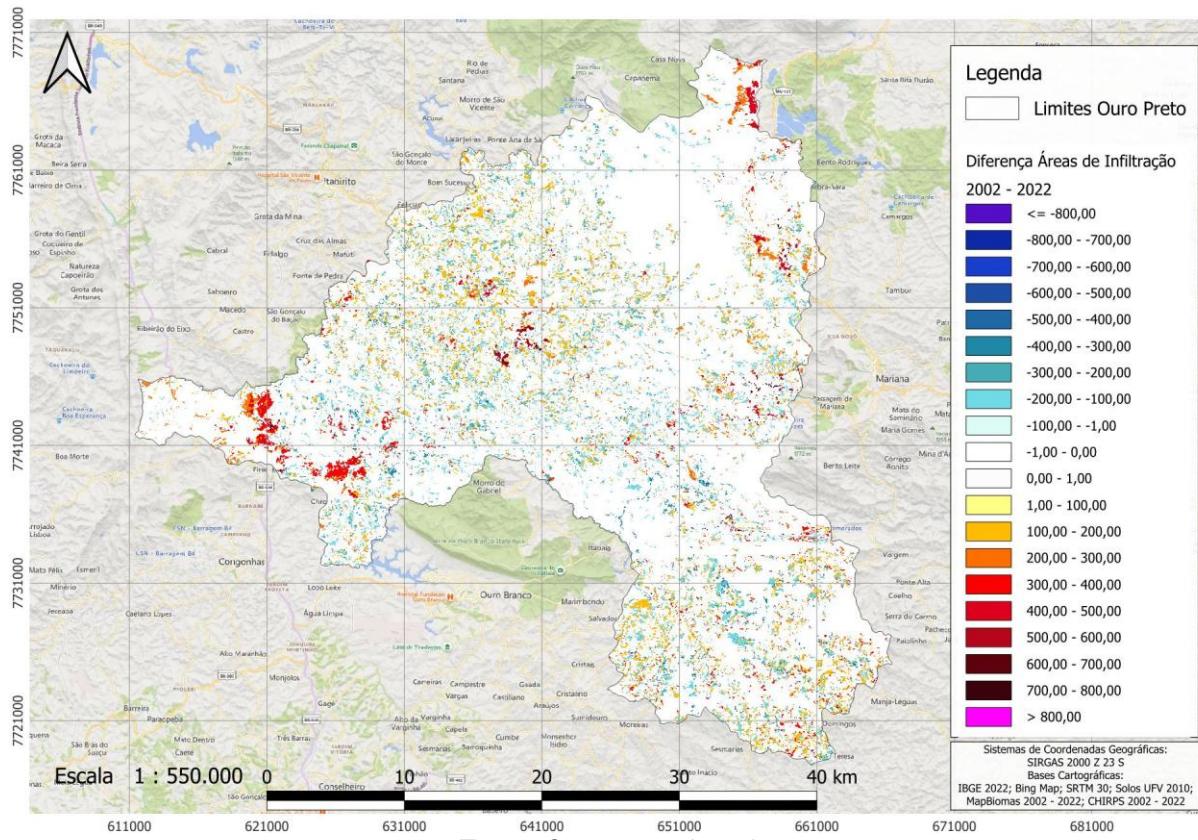


Fonte: Os autores (2025).

A diferença no total de infiltração entre 2002 e 2022 indica que, anualmente, cerca de 1,23 bilhão de litros de água deixaram de infiltrar no sistema, passando a compor o escoamento superficial, sendo as áreas de maior perda de infiltração claramente representadas na Figura

11. Este resultado corrobora a hipótese de comprometimento da recarga, alinhando-se aos achados de Barbedo *et al.*, (2022) sobre a diminuição do armazenamento hídrico em Minas Gerais entre os anos de 2003 e 2020.

Figura 11 - Diferença na taxa de infiltração estimada entre os anos de 2002 e 2022 para o município de Ouro Preto, MG, em mm/ano



Fonte: Os autores (2025).

Essa diminuição da recarga hídrica subterrânea, somada ao rebaixamento do nível freático e à remoção das formações litológicas que armazenam água (para aprofundamento das cavas de mineração), bem como o aumento populacional e da demanda hídrica, compromete a resiliência dos aquíferos. Caso as tendências de expansão urbana e da mineração sobre áreas de recarga se mantenham, projeta-se um cenário de crescente insegurança hídrica, afetando nascentes e cursos d'água essenciais para a bacia do Rio Doce e do Rio das Velhas, e, consequentemente, o abastecimento municipal e a disponibilidade hídrica na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo confirmou a hipótese de que as alterações no uso e cobertura da terra em Ouro Preto, entre 2002 e 2022, resultaram em impactos hidrológicos mensuráveis, caracterizados pelo aumento do escoamento superficial e redução da capacidade de infiltração. Tais mudanças potencializam processos de degradação ambiental, como a intensificação da erosão hídrica, o assoreamento

de corpos d'água e a diminuição da recarga de aquíferos, afetando diretamente a vazão de base das nascentes.

A análise espacial demonstrou que a redução da infiltração ocorre, criticamente, em zonas de alta aptidão hidrogeológica (áquiferos itabiríticos e quartzíticos), sinalizando um comprometimento da segurança hídrica local caso as tendências atuais de ocupação se mantenham. A contribuição científica deste trabalho reside na aplicação de uma abordagem metodológica acessível para a gestão hídrica municipal, mesmo em áreas com baixa disponibilidade de dados, e na análise de uma série histórica longa (20 anos) no Quadrilátero Ferrífero. Isso demonstra a aplicabilidade de modelos hidrológicos em SIG para o diagnóstico de bacias complexas, mesmo diante de limitações como o uso de dados secundários e a ausência de calibração in situ. No entanto, ressalta-se que estimativas mais precisas dependem de pesquisas futuras que mapeiem as características hidráulicas dos solos regionais (textura, profundidade, capacidade de saturação) e realizem a calibração de campo dos coeficientes de escoamento para as diferentes classes de solo, declividade e uso da terra.

Conclui-se que a integração de variáveis hidrológicas na gestão territorial é primordial

para a segurança hídrica de Ouro Preto. Recomenda-se que os mapas gerados nesta pesquisa subsidiem a revisão do Plano Diretor e da Lei de Uso e Ocupação do Solo, orientando a gestão dos recursos hídricos com prioridade para a conservação das áreas de recarga remanescentes, a fim de garantir a resiliência frente às pressões econômicas e climáticas futuras.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Raquel Rossini pela excelência e apoio na tradução deste manuscrito para a língua inglesa.

## FINANCIAMENTO

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio de bolsas de pesquisa concedidas a Paulo de Tarso A. Castro.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. de. O Cráton de São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, p. 349-364, 1977. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1977349364>

ASCE - AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS; WPCF - WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. Design and construction of sanitary and storm sewers. **New York: American Society of Civil Engineers**, p. 1 – 332, 1986 (Reimpressão de 1969). Disponível em: <https://ahmadsana.tripod.com/Courses/project1/sewer-specs.pdf>. Acesso em: 4, fev. 2026.

ANDRADE, L. N.; LEITE, M. G. P.; BACELLAR, L. A. P. Composição mineralógica e geoquímica dos solos do Parque Estadual do Itacolomi - Ouro Preto/MG. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 3, 2012. <https://doi.org/10.5380/abequa.v3i1-2.16838>

BARAZZUOLI, P.; IZZO, S.; MENICORI, P.; MICHELUCCINI, M.; SALLEOLINI, M. A new practical aid to regional hydrogeologic planning: the runoff coefficient map. **Environmental Management**, v. 13, n. 5, p.

613–622, 1989.

<https://doi.org/10.1007/bf01874967>

BARBEDO, R.; FLEISCHMANN A. S.; SIQUEIRA, V.; BRÉDA, J. P.; MATTE, G.; LAIPELT, L.; AMORIM, A.; ARAÚJO, A. A.; FUCKNER, M.; MELLER, A.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; RUHOFF, A.; PAIVA, C. D. de. Water storage variability across Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 27, e32, 2022. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220077>

BARFIELD, B. J.; WARNER, R. C.; HAAN, C. T. **Applied Hydrology and Sedimentology for Disturbed Areas**. **Oklahoma Technical Press**, Stillwater, Oklahoma, p. 12-49, 1983. Disponível em: <https://semspub.epa.gov/work/05/224351.pdf>. Acesso em: 4, fev. 2026.

BONNA, J. L. **Mapeamento pedológico e de suscetibilidade erosiva no Alto Córrego Prata (Ouro Preto-MG)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-8RBKKX>. Acesso em: 4, fev. 2026.

COSTA, A. M. da; SALIS, H. H. C. de; VIANA, J. H. M.; LEAL PACHECO, F. A. Groundwater recharge potential for sustainable water use in urban areas of the Jequitiba River Basin, Brazil. **Sustainability**, v. 11, n. 10, p. 2955, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11102955>

COSTA, S. Á. D.; KER, J. C.; SIMÕES, D. F. F.; FONTES, M. P. F.; FABRIS, J. D.; ANDRADE, F. V. Pedogênese e classificação de latossolos desenvolvidos de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 359–371, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200001>

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; CODEMIG. **Mapas geológico e de recursos minerais do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2014. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20786>. Acesso em: 4, fev. 2026..

D'ALBERTO, L.; LUCIANETTI, G. Misinterpretation of the Kenessey method for the determination of the runoff coefficient: a review. **Hydrological Sciences Journal**, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1578965>

DELGADO, M. I.; CAROL, E. S.; CASCO, M. A. Land-use changes in the periurban interface: Hydrologic consequences on a flatland-watershed scale. **Science of The Total Environment**, v. 722, 2020.

- <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137836>
- FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRECK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- FENN, D. G.; HANLEY, K. J.; DEGEARE, T. V. Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites. **US Environmental Protection Agency**, Report No. EPA/530/SW168, 1975. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100OH2M.txt>. Acesso em: 4, fev. 2026.
- FERREIRA, Q. C. G.; BACELLAR, L. A. P. Avaliação preliminar das condições hidrogeológicas na área do município de Ouro Preto, MG. **Geonomos**, v. 18, p. 13–21, 2010. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v18i1.63>
- FREY, S. K.; MILLER, K.; KHADER, O.; TAYLOR, A.; MORRISON, D.; XU, X.; BERG, S. J.; HWANG, H. T.; SUDICKY, E. A.; LAPEN, D. R. Evaluating landscape influences on hydrologic behavior with a fully-integrated groundwater–surface water model. **Journal of Hydrology**, v. 602, n. 126758, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126758>
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 150066, 2015. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- GALVÃO, P.; HIRATA, R.; CONICELLI, B. Estimating groundwater recharge using GIS-based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 10, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7579-z>
- IBGE. **Censo Demográfico 2022**: Ouro Preto (MG). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/ouro-preto>. Acesso em: 4, fev. 2026.
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Mapa de Circunscrições Hidrográficas de Minas Gerais - 2023**. Belo Horizonte: Igam, 2023. Escala: 1:100.000. Disponível em: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/4468>. Acesso em 4, fev. 2026..
- JUKIĆ, D.; DENIĆ-JUKIĆ, V. Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall–runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 373, n. 3–4, p. 302–315, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.035>
- KENESSEY, B. Lefolyási tényezők és retenciók. Hidrológiai tanulmány [Flow factors and retention. Hydrological study. **Vízügyi Közlemények**, v. 12, n. 1, p. 55–76, 1930. Disponível em: [https://adtplus.arcanum.hu/en/collection/Vizu\\_gyiKozlemenyek/](https://adtplus.arcanum.hu/en/collection/Vizu_gyiKozlemenyek/). Acesso em: 4, fev. 2026.
- LEMOS R. C. DE; SANTOS R. D. DOS. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1996. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330369>. Acesso em: 4, fev. 2026.
- LIU, Y. **Development and application of a GIS-based hydrological model for flood prediction and watershed management**. PhD Thesis. Vrije Universiteit Brussel, Brussels, 2004.
- MAHMOUD, S. H.; ALAZBA, A.A. Hydrological Response to Land Cover Changes and Human Activities in Arid Regions Using a Geographic Information System and Remote Sensing. **PLoS ONE**, v. 10, n. 4, e0125805, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125805>
- MESSIAS, M. C. T. B.; LEITE, M. G. P.; MEIRA NETO, J. A. A.; KOZOVITS, A. R.; TAVARES, R. Soil-Vegetation Relationship in Quartzitic and Ferruginous Brazilian Rocky Outcrops. **Folia Geobotanica**, v. 48, n. 4, p. 509–521, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12224-013-9154-4>
- MESSIAS, M. C. T. B.; MENEGATTO, M. F.; PRADO, A. C. C.; SANTOS, B. R.; GUIMARÃES, M. F. M. Uso popular de plantas medicinais e perfil socioeconômico dos usuários: um estudo em área urbana em Ouro Preto, MG, Brasil. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 17, n. 1, p. 76–104, 2015. [https://doi.org/10.1590/1983-084X/12\\_139](https://doi.org/10.1590/1983-084X/12_139)
- MIGUEL, R.; CAMPOS, J. E. G. Relações entre Mineração e Recursos Hídricos Subterrâneos: O Caso da Mina Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. **Águas Subterrâneas**, v. 38, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.14295/ras.v38i1.30219>
- MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Exportações Gerais**. Comex Stat. Base de Dados. Brasília: Ministério da Economia. 2021-2022. Disponível em:

- <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 4, fev. 2026.
- MOURÃO, M. A. A. Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG.** Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ENGD-7AJNZE>. Acesso em: 4, fev. 2026.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil.** 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421p.
- PEDROSA, M. A. F. Avaliação de susceptibilidade a movimentos de massa e erosão no município de Ouro Preto/MG em escala regional.** Dissertação (Mestrado em Geotecnologia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 167 f., 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10628>. Acesso em: 4, fev. 2026.
- PEIXOTO, F. DA S.; SOARES, J. A.; RIBEIRO, V. S.** Conflicts over water in Brazil. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 34, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-59410>
- QUINTON, J. N.; CATT, J. A.** The effects of minimal tillage and contour cultivation on surface runoff, soil loss and crop yield in the long-term Woburn Erosion Reference Experiment on sandy soil at Woburn, England. **Soil Use and Management**, v. 20, n. 3, p. 343–349, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00379.x>
- RAHAMAN, Z. A.** Runoff coefficient (C value) evaluation and generation using rainfall simulator: a case study in urban areas in Penang, Malaysia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, n. 2168, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08575-1>
- RUCHKYS, U. A. Patrimônio geológico e geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: potencial para a criação de um geoparque da UNESCO.** 2007. 211f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-76LHEJ>. Acesso em: 4, fev. 2026.
- RUNNING, S.; MU, Q.; ZHAO, M.; MORENO, A.** MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061>
- RUSHBROOK, P.; PUGH, M.** Solid Waste Landfills in Middle- and Lower-Income Countries: A Technical Guide to Planning, Design, and Operation. **World Bank technical paper**, n. 426, 1999. <https://doi.org/10.1596/0-8213-4457-9>
- SAVARY, S.; ROUSSEAU, A. N.; QUILBE, R.** Assessing the effects of historical land cover changes on runoff and low flows using remote sensing and hydrological modeling. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 14, n. 6, p. 575–587, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000024)
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G.** Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p. 18–39, 2002. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>
- SILVA, C. DE O. F.; MAGNONI, P. H. J.; MANZIONE, R. L.** Orbital Remote Sensing For Evapotranspiration Modeling: Theoretical Overview and Applications In Cloud Computing. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, v. 15, n. 3, p. 425–468, 2021. <https://doi.org/10.18011/bioeng2021v15n3p425-468>
- SOUZA, C. M., JR.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; A. ALENCAR, A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; G. FERREIRA, L.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; de OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; FERREIRA NETO, L. C.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T.** Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, 2735, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- SOUZA, E.** Digital soil mapping and modeling of water recharge in Rio Doce Basin, State of Minas Gerais. Tese (Doutorado em Fertilidade do solo e nutrição de plantas; Gênese, Morfologia e Classificação, Mineralogia, Química,) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/1642>. Acesso em: 4, fev. 2026.
- SOUZA, L. de A.** Do Quadrilátero Ferrífero ao Quadrilátero Aquífero: territorialidades

- conflitantes na produção de um espaço social extensivo à Região Metropolitana de Belo Horizonte-MG. **GEOUSP Espaço e Tempo** (Online), [S. l.], v. 25, n. 3, p. 168–189, 2021. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2021.188865>
- THAKUR, J. K.; SINGH, S. K.; EKANTHALU, V. S. Integrating remote sensing, geographic information systems and global positioning system techniques with hydrological modeling. *Applied Water Science*, v. 7, n. 4, p. 1595–1608, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0384-5>
- TILAHUN, K.; MERKEL, B. J. Estimation of groundwater recharge using a GIS-based distributed water balance model in Dire Dawa, Ethiopia. **Hydrogeology Journal**, v. 17, n. 6, p. 1443–1457, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0455-x>
- UFV (Universidade Federal de Viçosa); CETEC (Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais); UFLA (Universidade Federal de Lavras); FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente). Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/1\\_ZkX59wE8ud3eL7l0-xh6SpokWr-7-4R/view](https://drive.google.com/file/d/1_ZkX59wE8ud3eL7l0-xh6SpokWr-7-4R/view). Acesso em: 4, fev. 2026.
- VALE, P. N. C. **Solo e topografia como condicionantes da distribuição da vegetação em fitofisionomias campestre e florestal em contato direto na serra da Brígida, Ouro Preto, MG.** Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- VARAJÃO, C. A. C.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; BRAUCHER, R.; COLIN, F.; NALINI JR. H.A. Estudo da evolução da paisagem do quadrilátero ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10be) e da pedogênese. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online], v. 33, n. 5, p. 1409-1425, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500032>
- WESTERHOFF, R. S. Using uncertainty of Penman and Penman–Monteith methods in combined satellite and ground-based evapotranspiration estimates. **Remote Sensing of Environment**, v. 169, p. 102-112, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.021>
- WHEATER, H.; EVANS, E. Land use, water management and future flood risk. **Land Use Policy**, v. 26, p. S251–S264, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.019>
- YANG, W.; JIN, F.; SI, Y.; LI, Z. Runoff change controlled by combined effects of multiple environmental factors in a headwater catchment with cold and arid climate in northwest China. **Science of The Total Environment**, v. 756, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143995>

## CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Lucas Mardones Gaião: Conceitualização, pesquisa, metodologia, curadoria de dados, análise de dados, redação do manuscrito original e redação - revisão e edição.

Daniela Arcanjo Paiola Ferreira: Metodologia, validação de dados e experimentos e redação - revisão e edição.

Roosevelt Heldt Júnior: Desenvolvimento, implementação e teste de software e redação - revisão e edição.

Paulo de Tarso Amorim Castro: Supervisão e redação - revisão e edição.

**EDITOR ASSOCIADO:** Silvio Carlos Rodrigues. 

**DISPONIBILIDADE DE DADOS:** Os dados que fundamentam os resultados deste estudo poderão ser disponibilizados pelo autor correspondente, mediante solicitação devidamente justificada [Lucas Mardones Gaião].



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.