



Características Físicas e Hidráulicas de Bacias de Retenção Implementadas Pelo Programa “Vida Nova Rio Formiga”

Tainara Silveira Leal Chicri¹, Alice Raquel Caminha², Ricardo Sousa Cavalcanti³, Michael Silveira Thebaldi⁴, Leyser Rodrigues Oliveira⁵, Vladimir Antônio Silva⁶

¹ Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Bambuí. E-mail: nanara_leal@hotmail.com - ORCID: 0000-0002-1681-9972. ² Universidade Federal de Lavras – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. E-mail: alice.caminha1@estudante.ufla.br - ORCID: 0000-0003-0882-6870. ³ Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Bambuí. E-mail: ricardo.cavalcanti@ifmg.edu.br - ORCID: 0000-0002-7348-8946. ⁴ Universidade Federal de Lavras – Departamento de Recursos Hídricos. E-mail: michael.thebaldi@ufla.br - ORCID: 0000-0002-4579-6714. ⁵ Centro Universitário Vale do Rio Verde. E-mail: prof.leyser@gmail.com - ORCID: 0000-0002-2902-1038. ⁶ Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Bambuí. E-mail: vladimir.silva@ifmg.edu.br - ORCID: 0000-0002-7331-4145.

Artigo recebido em 16/08/2024 e aceito em 02/12/2024

RESUMO

As bacias de retenção são técnicas de conservação de solo para acúmulo temporário de água e sedimentação de sólidos em suspensão. A avaliação da potencialidade de implantação destas estruturas foca nos aspectos de custos e operação, porém pouca atenção tem sido dada ao fato de que a técnica demanda manutenção constante. Este estudo avaliou as características físicas e hidráulicas de bacias de retenção do programa “Vida Nova Rio Formiga”, construídas em áreas de estrada e pastagem, de forma a promover o estabelecimento de medidas para seu manejo. Utilizou-se um sistema de monitoramento da infiltração, além do permeâmetro de Guelph e penetrômetro de impacto tipo Stolf para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado e a resistência à penetração, respectivamente. Verificou-se que as bacias em áreas de estrada recebem mais água e sedimentos comparadas às de pastagem. As bacias B9 e B3 tiveram as maiores variações no nível de água, enquanto a B2, a menor. Quanto à condutividade hidráulica, B4 e B2 (pastagem) apresentaram maiores valores, ao contrário de B9 e B1 (estrada). A resistência à penetração foi maior em área de pastagem. Os resultados destacam a necessidade de manutenção cuidadosa e a importância de considerar a compactação do solo e controle de sedimentos para otimizar a função das bacias de retenção.

Palavras-Chave: Condutividade hidráulica do solo. Obras de terra. Sedimentos. Técnicas conservacionistas do solo.

Physical and Hydraulic Characteristics of Retention Basins Implemented by the “Vida Nova Rio Formiga” Program

ABSTRACT

Retention basins are soil conservation techniques for the temporary accumulation of water and for suspended solids sedimentation. The evaluation of the potential implementation of these structures focuses on cost and operational aspects, but minor attention has been given to its constant maintenance requirement. This study evaluated the physical and hydraulic characteristics of retention basins from the “Vida Nova Rio Formiga” program, constructed in road and pasture areas. An infiltration monitoring system was used, along with a Guelph permeameter for determining saturated soil hydraulic conductivity and a Stolf impact penetrometer for measuring resistance to penetration. It was found that basins in road areas received more water and sediments compared to those in pasture areas. Basins B9 and B3 had the largest variations in water level, while B2 had the smallest. Regarding the hydraulic conductivity, B4 and B2 (pasture) had higher values, in contrast to B9 and B1 (road). Penetration resistance was higher in pasture areas. The results highlight the need for careful maintenance and the importance of considering soil compaction and sediment control to optimize the function of the retention basins.

Keywords: Soil hydraulic conductivity. Earthworks. Sediments. Soil Conservation Techniques.

Introdução

O solo e a água são componentes essenciais para o desenvolvimento e a sustentabilidade de sistemas agrícolas e naturais. O

uso inadequado desses recursos, impulsionado por atividades humanas como a poluição, o desmatamento e a degradação do solo e da água, tem comprometido o equilíbrio natural,

Chicri, T. S. L., Caminha, A. R., Cavalcanti, R. S., Thebaldi, M. S., Oliveira, L. R., Silva, V. A.

aumentando os impactos ambientais negativos. Peixoto et al. (2020) destacam que estes impactos levam a processos danosos ao ambiente, como a contaminação da água e o agravamento dos processos erosivos devido à falta de manejo sustentável das bacias hidrográficas e ao uso inadequado dos recursos naturais.

A escassez de recursos hídricos é uma problemática crescente em várias regiões do Brasil, e a falta de infraestrutura adequada, aliada a menores investimentos para mitigar esses impactos, agrava ainda mais essa situação. O município de Formiga enfrentou, em 2014, uma crise hídrica que levou ao desabastecimento de água tratada em várias residências (Programa Vida Nova Rio Formiga [PVNRF], 2018). A captação de água da cidade é realizada no rio Formiga, o principal manancial que abastece a Estação de Tratamento de Água (ETA), além de poços localizados na área urbana e rural, que auxiliam no abastecimento (Serviço Autônomo de Água e Esgoto [SAAE], 2018). Sendo assim, foi necessário que o SAAE, responsável pelo abastecimento de água, adotasse medidas emergenciais durante os dias mais críticos, priorizando as atividades essenciais e impondo um regime constante de economia de água para a população.

Diante desse cenário, foi idealizado o programa “Vida Nova Rio Formiga”, criado pela Lei Municipal nº 5082 de 11 de janeiro de 2016, ratificada pela Lei nº 5157/2017 e regulamentada pelo Decreto 7122/2017, que teve como objetivo realizar ações na sub-bacia do rio Formiga para o aumento da quantidade e qualidade de suas águas. O programa, gerido por entidades públicas e financiado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do programa Produtor de Águas (PVNRF, 2018), baseia-se no incentivo financeiro dos proprietários rurais, por meio do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), à adoção de práticas conservacionistas em suas propriedades. Dessa forma, a implementação de estratégias de conservação do solo deve ser priorizada, como obras de terraceamento, construção de bacias de retenção em estradas rurais e preservação de nascentes, uma vez que estas técnicas não apenas minimizam o escoamento superficial direto, mas também garantem a infiltração de água no solo e a recarga subterrânea, aumentando a disponibilidade de água na estação seca (Baird et al., 2020).

Diversos projetos que implementaram técnicas conservacionistas de uso do solo apresentaram resultados positivos, como o “Conservador das Águas” em Extrema – MG, o

“Vida ao Marinheirando” em Votuporanga – SP, o “Vida ao Córrego Olhos d’Água” em Olímpia – SP, e o próprio Programa “Vida Nova Rio Formiga” que constituem em exemplos a serem seguidos (Nascimento et al., 2020).

Neste sentido, alguns tipos de estruturas visam atender à conservação, aproveitamento e mitigação de processos deletérios da qualidade do solo e água, tendo em vista os diferentes tipos de solos, topografias e espaços territoriais disponíveis. Uma das soluções está na alocação de bacias de retenção, estruturas que, ao longo do tempo, se tornaram alternativas viáveis tanto do ponto de vista técnico quanto econômico (Aragão et al., 2019; Fernandes et al., 2018; Robinson et al., 2010).

Essas estruturas têm como objetivo o acúmulo de água, o amortecimento do fluxo, a redução do pico de vazão e a sedimentação de sólidos em suspensão (Dadalto et al., 2016). São amplamente aplicadas para a proteção de estradas rurais e dimensionadas com base em modelos de chuvas intensas, área de drenagem e declividade. Além disso, as bacias de retenção favorecem a infiltração da água no solo, o que contribui para o controle de processos erosivos. No entanto, é esperado que em áreas onde tenham sido aplicadas técnicas conservacionistas de solo, ocorra, nos primeiros estágios, maior susceptibilidade à erosão, devido à desagregação das partículas durante a execução das obras. Porém, após algum tempo, a estrutura do solo tende a ser recuperada, proporcionando redução nas perdas de solo por erosão hídrica (Naba & Wolde, 2023; Srivastava et al., 2023).

Estudos como o de Fiener et al. (2005), mostram que essas bacias são eficientes na redução do escoamento superficial e na prevenção da erosão nas áreas inferiores, sendo capazes de reter entre 50% e 80% dos sedimentos. Segundo os autores, a combinação dessa técnica com outras medidas conservacionistas de solo pode reduzir custos de manutenção e minimizar danos às lavouras próximas, já que a dragagem dos sedimentos retidos é necessária para manter a função hidrológica das bacias. Basham et al. (2024) avaliaram diferentes tipos de bacias de retenção nos Estados Unidos e observaram que alguns modelos conseguiram atingir a meta de retenção de 80%, enquanto outros apresentaram desempenhos variados.

Entretanto, embora a eficácia das bacias de retenção seja amplamente reconhecida, os programas de proteção a bacias hidrográficas, como o programa Produtor de Águas da ANA, têm focado, majoritariamente, no planejamento técnico

e de custos. Pouca atenção tem sido dada ao fato de que estas estruturas demandam manutenção constante, o que é fundamental para garantir sua eficácia a longo prazo. Desta forma torna-se fundamental avaliar as características físicas e hidráulicas dessas bacias para fomentar o planejamento de atividades de manutenção em projetos.

As características físicas e hidráulicas do solo, como resistência à penetração, teor de água, condutividade hidráulica do solo saturado e textura, influenciam diretamente o desempenho das bacias de retenção, já que possuem efeito sobre a infiltração e movimentação da água no solo. A resistência à penetração condiciona o crescimento radicular e as taxas de infiltração. Solos com maior compactação apresentam resistência à penetração elevada, o que restringe a infiltração e favorece o escoamento superficial. Esse fator é especialmente relevante para o desempenho de bacias de retenção, pois pode prejudicar a recarga subterrânea e aumentar a ocorrência de transbordamentos (Dias et al., 2023).

Da mesma forma, o teor de água inicial do solo influencia significativamente a infiltração, já que solos secos têm maior capacidade de absorver água — processo conhecido como abstração inicial, que compreende a quantidade de água retida pelo solo antes que o escoamento superficial ocorra. Em solos saturados, essa capacidade é reduzida, e aumenta a probabilidade de geração de escoamento superficial direto (Carvalho et al., 2021; Falk et al., 2024).

Já a condutividade hidráulica saturada é apontada como uma das variáveis hidrológicas do solo mais importantes relacionadas ao movimento da água, sendo um determinante primário do processo de infiltração. Esse atributo descreve o dinamismo do sistema poroso, englobando propriedades associadas à porosidade, como o tamanho dos poros, quantidade, morfologia, continuidade e orientação. Além disso, fatores como textura, conteúdo de matéria orgânica no solo e uso da terra podem influenciar significativamente esta propriedade (Bargués-Tobella et al., 2024; Hmaied et al., 2024).

A textura do solo, por sua vez, que envolve a proporção de partículas de areia, silte e argila, influencia diretamente a capacidade de retenção de água. Solos argilosos, com maior número de microporos, de maneira geral, apresentam drenagem mais lenta, com exceção dos latossolos, que possuem propriedades físicas e hidráulicas únicas, já que possuem textura argilosa, mas as suas propriedades hidráulicas se assemelham à de

solos arenosos, levando estes a terem uma alta condutividade hidráulica quando saturados (Nogueira et al., 2021). Solos arenosos, com maior condutividade, permitem drenagem mais rápida, mas retêm menor quantidade de água (Karahan & Pachepsky, 2022; Mesele et al., 2024).

Acredita-se que as bacias de retenção implantadas no âmbito do programa “Vida Nova Rio Formiga” possuam características físicas e hidráulicas que, quando analisadas de maneira detalhada, possam fornecer subsídios para otimizar o seu manejo e garantir a eficácia das ações conservacionistas a longo prazo. Assim, as bacias de retenção, quando bem dimensionadas e com devidas manutenções periódicas, podem desempenhar um papel essencial na melhoria da qualidade e quantidade de água na sub-bacia do rio Formiga, além de contribuir significativamente para a recuperação dos solos e o controle da erosão.

Com isso, este trabalho visa avaliar as características físicas e hidráulicas das bacias de retenção implantadas no projeto piloto do programa “Vida Nova Rio Formiga”, a fim de propor medidas adequadas ao manejo dessas bacias e contribuir para o aprimoramento do planejamento de atividades de manutenção, garantindo a continuidade e a eficiência das práticas conservacionistas.

Material e métodos

Caracterização da Área de Estudo

O município de Formiga está localizado na região Centro-Oeste do Estado de Minas Gerais, e possui cerca de 68.248 habitantes, distribuídos em uma área de 1.502 km² (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2022). A sub-bacia do rio Formiga encontra-se em área de ecótono entre Cerrado e Mata Atlântica, com formações predominantes de floresta estacional semidecidual. O solo predominante é o Latossolo Vermelho Amarelo, sendo também frequentes os Cambissolos e Argissolos (Infraestrutura de dados espaciais [IDE-SISEMA], 2024).

O clima da região é do tipo subtropical, caracterizado por duas estações bem definidas: o verão chuvoso, com temperaturas mais elevadas, e o inverno seco, com temperaturas mais amenas (Martins et al., 2018; Ribeiro et al., 2022).

Na Figura 1 estão representadas as precipitações totais anuais dos dez anos anteriores à coleta dos dados de nível d'água e aporte de sedimentos nas bacias de retenção (2009-2019).

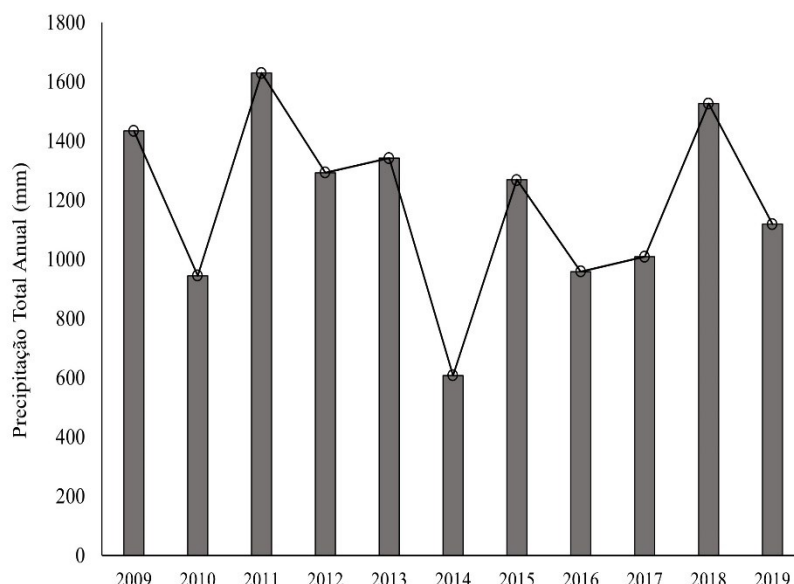


Figura 1. Precipitação Total Anual (mm) referente à estação meteorológica automática de Formiga – MG (A524), para o período de 2009-2019. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024).

A precipitação total anual, ao longo dos meses, é caracterizada pela maior parte das chuvas concentrada entre dezembro e março. O restante distribui-se principalmente nos meses de outubro e novembro, conforme pode ser verificado na Figura

2, que apresenta as precipitações mensais para o ano hidrológico 2019-2020.

A precipitação média diária mensal para o ano hidrológico 2019-2020, por sua vez, é apresentada na Tabela 1.

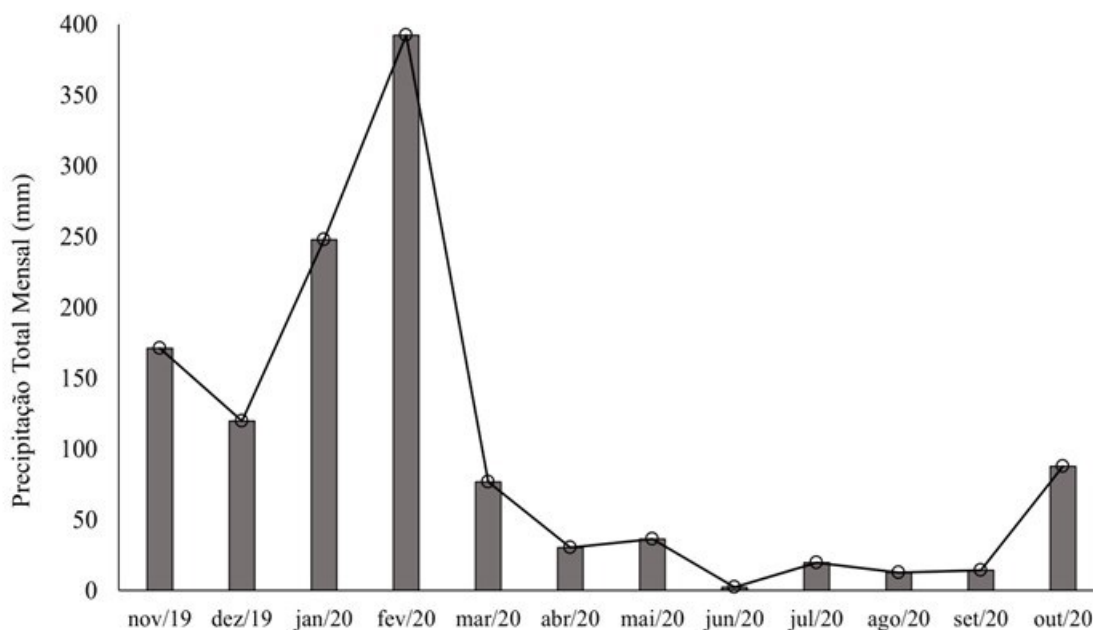


Figura 2. Precipitação Total Mensal (mm) referente à estação meteorológica automática de Formiga - MG (A524), para o ano hidrológico 2019-2020. Fonte: INMET (2024).

Tabela 1. Precipitação média diária mensal referente à estação meteorológica automática de Formiga/MG (A524), entre os anos de 2019 e 2020.

Mês	Precipitação Média Diária Mensal (mm)
Novembro (2019)	5,71
Dezembro (2019)	3,86
Janeiro (2020)	8,00
Fevereiro (2020)	13,53
Março (2020)	2,48
Abril (2020)	1,013
Mai (2020)	1,17
Junho (2020)	0,09
Julho (2020)	0,66
Agosto (2020)	0,41
Setembro (2020)	0,48
Outubro (2020)	2,84

Fonte: INMET (2024).

No município, a forma típica de relevo é representada por morros de vertentes muito íngremes e topo aplainado ou pontiagudo, geralmente de rochas maciça (gnaisse), resultantes da exumação e dissecação de estruturas dobradas do pré-cambriano (cristas apalcheanas), sendo a zona de maiores altitudes e relevo mais acidentado. Estes morros se alinham em cristas, que seguem as antigas direções de dobramentos.

A bacia hidrográfica do rio Formiga está localizada à montante da barragem de captação de água bruta do SAAE de Formiga/MG, autarquia responsável pela captação, tratamento e distribuição de água no município.

As bacias de retenção avaliadas foram construídas em 2016 e selecionadas em função da acessibilidade à propriedade, em que o produtor rural escolhido firmou parceria com o programa “Vida Nova Rio Formiga”. A propriedade em estudo é composta por área de pastagem, plantação de eucalipto e vegetação nativa e sua atividade principal é a pecuária. Localiza-se, de maneira geral, em área de Latossolo Vermelho Amarelo.

Para o desenvolvimento dos ensaios, foram selecionadas nove bacias de retenção, dentre elas, cinco marginais à estrada rural que liga a Comunidade Morro das Pedras com a área urbana do município de Formiga e as outras quatro localizadas em área de pastagem.

Estas possuem formato semicircular com as dimensões de 10 metros de diâmetro e 1,4

metros de profundidade, respeitando as condições físicas do terreno. Para dimensioná-las, foram considerados a classe de declividade, o tipo de solo e a intensidade máxima de precipitação registrada em um período de 24 horas para a região de Formiga - MG, com base em uma série histórica de 10 anos.

As bacias construídas próximas à estrada têm a finalidade de receber a sua drenagem, por meio de canais. As bacias da área de pastagem não recebem água de dreno superficial algum e têm a finalidade de acumular a precipitação pluvial para infiltração, além dos produtores rurais poderem utilizá-las, ocasionalmente, para a dessedentação de animais. Dessa maneira, pôde-se definir dois grandes grupos de bacias de retenção avaliadas: o primeiro, delimitado pela área de estrada (bacias de numeração ímpar) e um segundo, pela área de pastagem (bacias com numeração par), executadas na microbacia do Córrego Quebradeira.

A microbacia do córrego Quebradeira possui uma área total de 2,76 km² e a maior parte de seu uso e ocupação do solo são relativas a áreas antropizadas com atividades agrícolas e pastoris. As demais são compostas por vegetação nativa e de silvicultura.

A localização do município de Formiga e a distribuição geográfica das bacias de retenção são apresentadas na Figura 3.

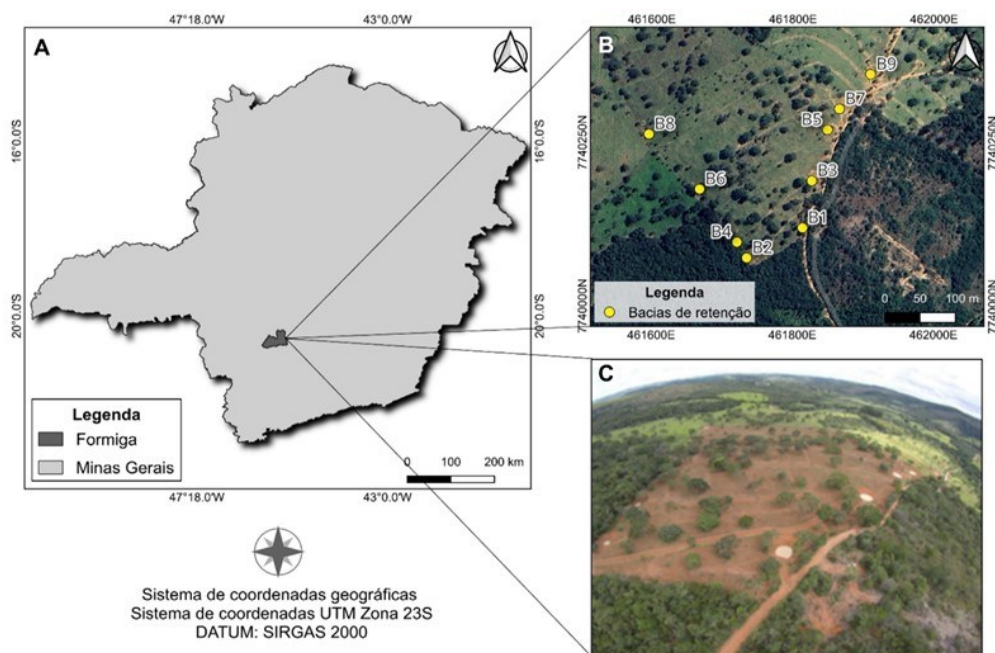


Figura 3. Localização do município de Formiga, no estado de Minas Gerais (A), distribuição geográfica das bacias de retenção (B) e foto aérea panorâmica do local (C).

Sistema de Monitoramento da Infiltração de Água

A infiltração na área contribuinte de cada bacia de retenção foi mensurada com o uso de um sistema de monitoramento da infiltração de água em terraços e bacias de acumulação. O equipamento tem por objetivo determinar o nível máximo atingido pela água armazenada nestas obras de contenção do escoamento superficial gerado pela chuva.

Este equipamento é constituído por uma haste guia, que é um tubo de PVC, com função de direcionar uma boia no sentido vertical que acompanha o nível da água. Essa boia é responsável pela elevação de um anel de nível que permite o registro do nível máximo que a água atinge.

Para a montagem de todo o sistema, foi aderida uma fita métrica adesiva (graduada em centímetros) de 1,5 m nos tubos de PVC rígido, sobrando, assim, 0,5 m de tubo liso acima da fita métrica. Para montagem das boias, foram utilizados caps de PVC, isopor, cola de silicone e a serra copo. Foi marcado na parte superior do cap o diâmetro do tubo e, o local, cortado com a serra copo de modo que a boia pudesse movimentar-se livremente nessa haste guia. Logo após, o isopor foi cortado de forma que encaixasse no cap, preenchendo toda a parte inferior. Por fim, foram obtidos os 9 anéis de nível, por meio do corte de

seções transversais de tubos de polietileno de, em média, 0,01 m de largura.

Com auxílio de uma cavadeira, as hastes guias foram enterradas no solo, na parte inferior na área de cada bacia de retenção a, pelo menos, 0,5 m de profundidade, e seu prumo conferido com um nível de mão, de forma a posicionar e manter a haste guia aprumada. Após a instalação dos tubos, colocou-se a boia, observando o apoio da base no solo e, em seguida, o anel marcador. A instalação do sistema ocorreu do dia 24 de outubro de 2019 até o dia 28 de outubro de 2019, data em que se teve o início das leituras, que ocorreram semanalmente, a partir do dia 31 de outubro de 2019.

Durante a ocorrência de chuvas que não causem escoamento superficial, a boia permanece na sua posição inicial, mas quando houver influxo de escoamento superficial direto, o material será conduzido para a bacia de retenção e a boia acompanha o nível da água. Após, a boia desce na haste guia acompanhando o nível da água que infiltra, porém, o anel de nível permanece no ponto mais alto que a boia atingiu. A aquisição de dados, então, foi realizada pela verificação do valor do nível indicado pelo anel, tendo como base o valor imediatamente acima deste.

Quando, ainda no momento da leitura, foi verificada a presença de água na bacia de retenção, a leitura era realizada normalmente. O nível do anel marcador então era rebaixado até o nível de água, sendo procedida a verificação do nível em que foi colocado o anel marcador. No caso de ocorrência

de assoreamento no fundo da bacia de acumulação, o nível de sedimentos foi registrado pelo medidor de nível, o que possibilitou o cálculo da quantidade de sedimentos carreados.

As leituras ocorreram no período de um ano (de novembro de 2019 a outubro de 2020), tendo em vista a necessidade da ocorrência do período de seca e do período chuvoso, sendo também adquiridos os dados pluviométricos registrados neste período pela estação meteorológica automática de Formiga – MG (Figuras 1 e 2; Tabela 1).

Para análise e comparação das séries de dados obtidos para cada bacia de retenção, foram utilizados box-plots e realizada análise de variância (ANOVA) em ranques, por meio do teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade estatística. Para comparação múltipla das séries, foi utilizado o teste de Tukey, também a 5% de probabilidade.

Ensaios de Resistência à Penetração e Umidade do Solo

Para medir a resistência à penetração do solo nas bacias de retenção avaliadas, foi utilizado um penetrômetro de Impacto tipo Stolf, cuja penetração ocorre por percussão e a determinação da penetração é feita por meio de escala graduada. Os ensaios foram realizados no dia 23/10/2021, com três repetições na área interior de cada bacia de retenção de água e sedimentos; uma repetição na área externa adjacente (AE) à cada bacia e três repetições em uma área próxima de vegetação nativa preservada (AP).

O equipamento, depois de montado, foi golpeado até a profundidade possível. Para o cálculo da resistência à penetração foi utilizada a Equação 1, que apresenta uma relação entre o número de impactos e a resistência do solo à penetração (Stolf, 1991). Para esta equação, considerou-se o valor da aceleração da gravidade de 10 m/s².

$$R = 0,1 \times \left[5,6 + 6,89 \times \left(10 \times \frac{NI}{P} \right) \right] \quad (1)$$

Em que: R = resistência de solo à penetração (MPa); NI = número de impactos; e P = penetração (cm).

O delineamento experimental empregado para análise dos dados de resistência à penetração foi inteiramente casualizado (DIC), com uma fonte de variação com 10 níveis (9 bacias de retenção e área de preservação) e três repetições. Para a ANOVA, foi realizado o teste F, a 5% de probabilidade estatística e, caso detectada diferença significativa entre médias, foi realizado teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade estatística.

Quando da realização dos ensaios de resistência à penetração, foram coletadas amostras deformadas nas profundidades de 0 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m, uma por profundidade. Para tal, foi utilizado um trado, com três repetições na área interior, três repetições na área exterior das bacias de retenção e, ainda, três repetições em uma área próxima de vegetação nativa preservada. Assim que coletadas, as amostras deformadas foram acondicionadas em recipientes de metal, revestidos com filme de policloreto de vinil (PVC) e fita adesiva larga, de forma a preservar a umidade do solo até que as análises fossem realizadas.

A umidade gravimétrica foi obtida em laboratório, com o uso de estufas com circulação de ar forçada, à temperatura de 105 °C. Após a obtenção da massa constante, as amostras foram resfriadas em dessecador e depois pesadas, determinando-se o peso da amostra seca.

A massa de água das amostras foi obtida por meio da diferença entre a massa da amostra úmida e seca (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, [EMBRAPA], 2017) e a umidade gravimétrica foi calculada por meio da Equação 2, cujos valores podem ser vistos na Tabela 2.

$$U = \frac{Ma}{Ms} \quad (2)$$

Em que: U = umidade gravimétrica (g/g); Ma = massa de água (g); e Ms = massa de solo seco em estufa, (g).

Tabela 2. Umidade gravimétrica do solo e estatísticas descritivas, em diferentes profundidades, de áreas internas e próximas às bacias de retenção de água e sedimentos avaliadas, além de área preservada adjacente.

Local	Profundidade (m)	U (g/g)	Média (g/g)	Desvio padrão (g/g)	Local	Profundidade (m)	U (g/g)	Média (g/g)	Desvio padrão (g/g)
B1	0 – 0,10	0,243	0,247	0,013	B5AE	0 – 0,10	0,170	0,174	0,005
	0,10 – 0,20	0,262				0,10 – 0,20	0,174		
	0,20 – 0,30	0,236				0,20 – 0,30	0,179		
B1AE	0 – 0,10	0,167	0,163	0,009	B6	0 – 0,10	0,164	0,171	0,007
	0,10 – 0,20	0,153				0,10 – 0,20	0,171		
	0,20 – 0,30	0,170				0,20 – 0,30	0,177		
B2	0 – 0,10	0,263	0,295	0,092	B6AE	0 – 0,10	0,162	0,164	0,017
	0,10 – 0,20	0,398				0,10 – 0,20	0,148		
	0,20 – 0,30	0,223				0,20 – 0,30	0,182		
B2AE	0 – 0,10	0,161	0,165	0,005	B7	0 – 0,10	0,251	0,252	0,009
	0,10 – 0,20	0,163				0,10 – 0,20	0,244		
	0,20 – 0,30	0,170				0,20 – 0,30	0,261		
B3	0 – 0,10	0,199	0,217	0,023	B7AE	0 – 0,10	0,154	0,171	0,015
	0,10 – 0,20	0,210				0,10 – 0,20	0,183		
	0,20 – 0,30	0,243				0,20 – 0,30	0,176		
B3AE	0 – 0,10	0,147	0,131	0,014	B8	0 – 0,10	0,178	0,192	0,013
	0,10 – 0,20	0,124				0,10 – 0,20	0,194		
	0,20 – 0,30	0,123				0,20 – 0,30	0,204		
B4	0 – 0,10	0,187	0,211	0,021	B8AE	0 – 0,10	0,162	0,166	0,003
	0,10 – 0,20	0,227				0,10 – 0,20	0,168		
	0,20 – 0,30	0,218				0,20 – 0,30	0,167		
B4AE	0 – 0,10	0,198	0,187	0,016	B9	0 – 0,10	0,195	0,185	0,029
	0,10 – 0,20	0,168				0,10 – 0,20	0,152		
	0,20 – 0,30	0,194				0,20 – 0,30	0,208		
B5	0 – 0,10	0,275	0,236	0,035	B9AE	0 – 0,10	0,151	0,239	0,133
	0,10 – 0,20	0,208				0,10 – 0,20	0,173		
	0,20 – 0,30	0,224				0,20 – 0,30	0,392		
AP	0 – 0,10	0,202	0,307	0,166					
	0,10 – 0,20	0,498							
	0,20 – 0,30	0,220							

Ensaio de Condutividade Hidráulica do Solo Saturado e Caracterização Textural

Para determinar a condutividade hidráulica do solo saturado, utilizou-se um permeâmetro de Guelph. Os ensaios foram realizados nos dias 28/08/2021, na área interna de cada bacia de retenção, e 02/10/2021, na AP. A abertura de cada furo de sondagem foi feita com o auxílio de um trado manual, com profundidade aproximada de 0,15 m. Logo após os procedimentos iniciais de montagem do equipamento, ocorreu a sua instalação no furo e, em seguida, cada ensaio foi iniciado, com a contagem do tempo de ensaio feita com o auxílio de um cronômetro.

Foram realizadas várias leituras em intervalos de tempo estimados de aproximadamente 1 minuto, monitorando a taxa de queda de água no reservatório, até que esta fosse constante, obtendo-se, assim, a “taxa de queda em estado estacionário”. Neste estágio, o solo está saturado, com bulbo de saturação estabelecido.

Durante os ensaios, utilizou-se apenas uma altura de carga no furo de sondagem. Assim, a condutividade hidráulica saturada medida in situ

(Kfs) foi determinada por meio da Equação 3, do método de um estágio (Reynolds et al., 1983).

$$K_{fs} = \frac{CQ}{(2\pi H^2 + \pi a^2 C + 2\pi H/\alpha)} \quad (3)$$

Em que: Kfs = condutividade hidráulica do solo saturado medida in situ (mm/h); Q = vazão da carga constante; H = altura de água constante no furo de sondagem (cm); α = parâmetro relacionado ao tamanho dos poros; a = raio do furo de sondagem (cm); e C = parâmetro denominado “fator de forma”, que depende da relação H/a e do tipo de solo.

Ainda, no dia 02/10/2021, uma amostra de solo composta superficial foi coletada na parte interna de cada bacia de retenção, a fim de caracterizar a granulometria dos sedimentos carregados. Também foi realizada uma amostragem superficial em dois pontos na área externa (AE), para controle. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Análise de Solos do IFMG, Campus Bambuí, e os resultados da análise granulométrica podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Distribuição granulométrica de amostras para caracterização dos sedimentos carregados às bacias de retenção, além de amostras coletadas em áreas adjacentes próximas.

Local	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Classificação Textural
B1	66,00	26,40	7,60	Média
B2	47,00	50,10	2,90	Argilosa
B3	43,90	41,90	14,20	Argilosa
B4	55,40	41,10	3,50	Argilosa
B5	58,40	35,10	6,50	Argilosa
B6	71,40	26,90	1,70	Média
B7	56,30	35,50	8,20	Argilosa
B8	55,60	41,40	3,00	Argilosa
B9	54,10	40,30	5,60	Argilosa
AE1	48,00	39,90	12,10	Argilosa
AE2	47,30	30,50	22,20	Média

Em que: B – bacia de retenção de água e sedimentos; AE – área externa adjacente às bacias de retenção de água e sedimentos. Fonte: Santos et al. (2018).

Resultados e Discussão

Sistema de Monitoramento da Infiltração de Água em Bacias de Retenção

Para avaliar o nível de água nas bacias de retenção estudadas, foram utilizados gráficos box-plot, bem como comparações múltiplas por meio de teste de Tukey a 5% de probabilidade, conforme apresentado na Figura 4.

Pela Figura 4A, observa-se que as bacias em área de pastagem (numeração par) apresentaram comportamento distinto daquelas da área de estrada (numeração ímpar), sendo que nas bacias de área de pastagem o nível atingido foi, em média, menor que nas bacias da área de estrada. Ainda, a variabilidade do nível de água nas bacias da estrada foi maior que nas áreas de pastagem, provavelmente em função do escoamento superficial direto direcionado às primeiras por meio de canais de drenagem, enquanto as bacias da

área de pastagem não receberam este tipo de contribuição.

As maiores variações do nível de água são apresentadas pelas bacias B9 e B3 seguidas pelas bacias B7 e B5. As bacias B1 e B9 apresentaram a maior mediana, enquanto a bacia B2 apresentou a menor variação de nível durante o período analisado. As séries de nível de água das bacias em área de pastagem foram significativamente diferentes ($p < 0,05$) à série obtida para a B1. Já as séries de nível de água das bacias área de estrada, em relação à B1, são estatisticamente iguais (Figura 4B). As bacias B1, B3, B5, B7 e B9, localizadas ao lado direito da estrada rural, receberam maiores volume de escoamento e, também, foi possível verificar uma maior variabilidade no nível de água, em relação à B2, B4, B6 e B8 localizadas em área de pastagem (Figura 4A).

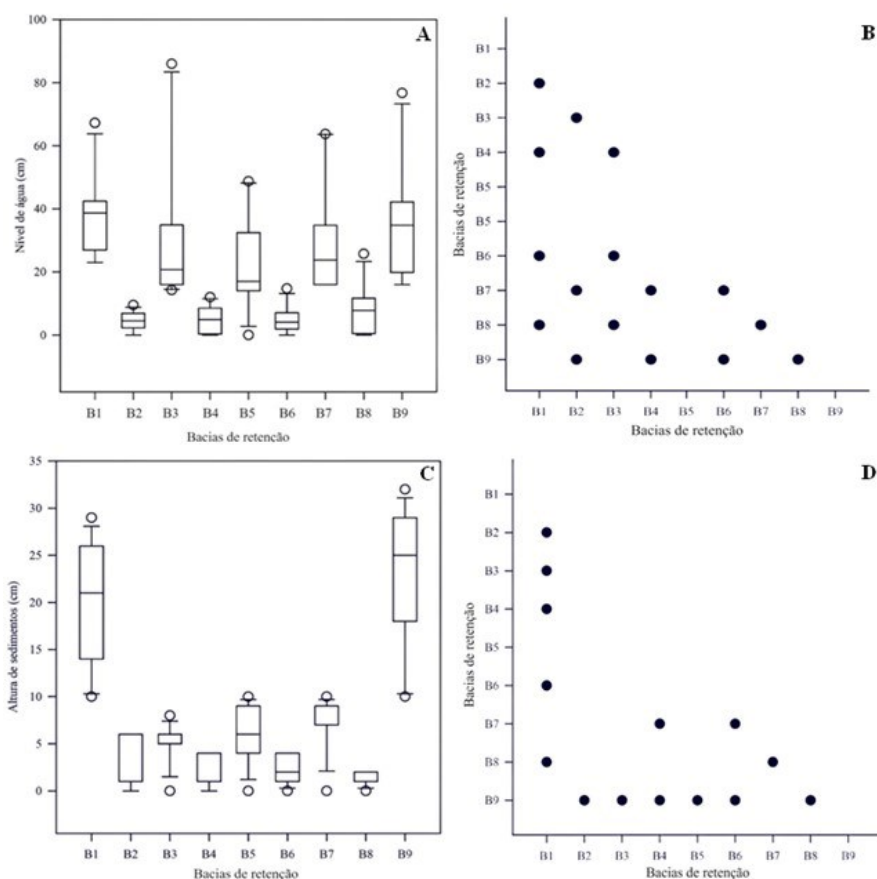


Figura 4. Box-plots dos valores observados do nível de água em cada uma das bacias de retenção de água e sedimentos monitoradas (A), comparação múltipla das séries de dados de nível de água em cada uma das bacias de retenção de água e sedimentos (B), box-plots dos valores observados de nível de sedimentos, e comparação múltipla entre séries de nível de sedimentos (D). Em B e D, os símbolos indicam diferenças significativas entre tratamentos.

Segundo Mendonça et al. (2009), com o escoamento superficial afluindo às bacias, a estrutura superficial do solo fica mais suscetível ao transporte de sedimentos, além de provocar compactação na subsuperfície, dificultando o movimento da água no perfil, o que explica a maior amplitude e valor máximo de nível d'água nas bacias de retenção em área de estrada (Figura 4A). Na bacia B1, 50% dos dados possuem valores entre 26,94 e 42,44 cm e o valor máximo foi de 65,69 cm. Além disso, foi detectado um outlier, indicando que o acúmulo de água na bacia se deu por algum evento extremo de precipitação durante o período da coleta dos dados. Solos de textura média apresentam equilíbrio entre os teores de areia, silte e argila, e normalmente possuem boa drenagem, boa capacidade de retenção de água e índice médio de erodibilidade. Isto, aliado ao fato desta estrutura receber a drenagem da estrada rural adjacente, pode ter levado a este valor atípico.

Já na bacia B3, observou-se a maior discrepância de acúmulo de água comparada com as outras bacias, e, ainda assim, não atingiu o nível máximo da obra, confirmando que esta exerceu satisfatoriamente sua função. O intervalo interquartil de 28,31 cm e a mediana de 20,75 cm indicam que os valores predominaram abaixo da média, ou seja, a bacia, na maioria dos eventos de chuva, não correu risco algum extravasamento, para as condições analisadas. O maior acúmulo de água e a presença de solo argiloso, com apreciável teor de silte (Tabela 2), indicam baixa capacidade de infiltração nessa bacia. Nazari et al. (2018) salientam que, em áreas com altos teores de silte, a possibilidade de obstrução dos poros é potencializada, diminuindo, consideravelmente, a permeabilidade do solo. Em função de sua instabilidade, a fração silte é pouco desejável no ambiente por ser a primeira a ser desprendida e arrastada pela ação das gotas de chuva, podendo levar ao assoreamento de corpos d'água (Gomes et al., 2007; Mesele et al., 2024).

Para o box-plot de nível de água de B4, o menor valor é coincidente com o primeiro quartil, possui uma mediana de 4,88 cm e um intervalo interquartil de 8,18 cm. Nesse sentido, há uma baixa variação do nível de água nessa bacia, o que leva à percepção de ocorrência do processo de infiltração. Já a bacia B5 apresenta 50% dos valores do nível de água na bacia abaixo de 17,00 cm, enquanto a bacia B6 apresentou o menor valor de mediana de 4,09 cm.

Durante um evento de precipitação, parte da água pode infiltrar e movimentar-se verticalmente no perfil e parte pode escorrer pela superfície do solo, caso o terreno apresente

declividade que contribua para este processo (Gonçalves & Libardi, 2013; Bronstert et al., 2023). Condições tais como: estrutura dos agregados, porosidade, umidade, atividade biológica, cobertura vegetal e declividade do terreno, dentre outras, influem fortemente na infiltração da água no solo (Almeida et al., 2018b; Owuor et al., 2016). Dessa forma, o conhecimento da capacidade de infiltração e retenção de água são fatores importantes, pois auxiliam na definição de políticas de proteção e de conservação do solo e da água, planejamento de sistemas de drenagem e gestão das águas pluviais (Basche & Delonge, 2019; Minh et al., 2018).

As bacias de retenção, concebidas para reservar água, acumulam, também, sedimentos carregados no escoamento. Assim, o monitoramento dos sedimentos e da qualidade da água é fundamental para o entendimento do processo de assoreamento que comumente ocorre em obras como estas (Hamel et al., 2015; MoayeriKashani et al., 2017). Essa abordagem fornece uma base sólida para a gestão eficaz das bacias de retenção, evidenciando a necessidade da aplicação de estratégias de mitigação dos impactos ambientais negativos associados à deposição de sedimentos.

A análise física dos sedimentos em bacias de retenção envolve a avaliação de aspectos como: matéria seca e volátil, distribuição do tamanho das partículas, densidade e variabilidade espacial dos poluentes comumente encontrados, incluindo metais e pesticidas (Kouyi et al., 2018). As propriedades físicas e químicas destes depósitos podem variar ao longo do tempo, influenciadas pela área de contribuição e pelas condições hidrodinâmicas da bacia, levando à variabilidade na distribuição do tamanho das partículas. El-Mufleh et al. (2014) destacam a importância de entender estas características para mitigar os impactos sobre águas subterrâneas, solos e ecossistemas e enfatizam a necessidade de utilizar uma abordagem multidisciplinar na caracterização destes sedimentos.

Para avaliação do aporte de sedimentos às bacias de retenção, foi utilizado o gráfico boxplot mostrado na Figura 4C, além de comparação múltipla entre séries (Figura 4D). A bacia de retenção B1 recebeu um maior aporte de sedimentos que B2 devido a um maior influxo de escoamento superficial direto (Figura 4A e 4B). Comparando esta dinâmica (Figuras 4A e 4C) às verificadas para as bacias de retenção B3, B5 e B7, pôde-se constatar que o escoamento superficial afluente à B1 estava causando processos erosivos, ou pelo menos ter um maior potencial para isso, já que houve uma maior proporcionalidade entre o

escoamento e a quantidade de sedimentos carregados para o interior de B1. Processo semelhante é notado para B9.

Os maiores volumes, tanto de água, quanto sedimentos, observados nas bacias que margeiam a estrada refletem o volume de escoamento superficial direto que são captados por elas. A cobertura superficial dos solos e a manutenção da vegetação às margens dos cursos d'água são fatores fundamentais no controle do escoamento superficial e no transporte de sedimentos, influenciando diretamente na qualidade e disponibilidade de água, como pode ser percebido na diferença entre as lâminas das bacias B2, B4, B6 e B8 (área de pastagem) e das bacias B1, B3, B5, B7 e B9 (área de estrada). A associação entre a fragilidade pedogenética do solo e o intenso revolvimento torna-o altamente suscetível à erosão hídrica, pois a rápida saturação do perfil favorece o escoamento superficial da água, que arrasta partículas de solo, o que pode explicar o elevado volume de sedimentos provenientes da estrada (Lotfalian et al., 2013; Seleznev et al., 2019; Wang et al., 2016).

Quanto à sua posição na área estudada, não há nenhuma bacia de retenção à montante de B1. Já B9 encontra-se na última posição, então espera-se maior quantidade de sedimentos carregados da estrada que porventura não tenham sido coletados pelas estruturas anteriores. Nas bacias B2 e B3 o aporte de sedimentos foi maior que na bacia B4, enquanto houve, nas bacias B5, B7 e B9, um maior aporte de sedimentos em comparação à B6 e B8. Nestas últimas, houve um menor aporte de sedimentos que as demais.

De maneira geral, a amplitude da lâmina de água acumulada nas bacias de retenção em área de pastagem acompanhou a amplitude da quantidade de sedimentos aportados a estas (Figuras 4A e 4C) que também tiveram valor máximo menor. Com esta verificação, pode-se inferir sobre uma maior capacidade de infiltração nestas estruturas, devido a estas, naturalmente, terem recebido uma menor quantidade de escoamento superficial, mas também, por não ter havido, durante o período de estudo, selamento superficial de seu fundo, devido aos sedimentos recebidos. Como as bacias de retenção propiciam maior tempo de oportunidade para infiltração, haverá uma maior recarga do lençol freático, resultando em um regime de produção de água mais uniforme durante o ano hidrológico (Baird et al., 2020; Masetti et al., 2016).

Silva et al. (2012) e Falk et al. (2024) enfatizam a importância de conhecer as propriedades físicas e hidráulicas do solo e suas

correlações, uma vez que estas têm importância fundamental no processo de infiltração, transporte e armazenamento de água, sendo influenciadas pelas condições de superfície do solo.

Apesar das reconhecidas contribuições qualitativas das práticas conservacionistas ao ambiente, ainda há um conhecimento quantitativo limitado sobre essas contribuições. Assim, é crucial avaliar o comportamento hidráulico e hidrológico nas áreas onde foram realizadas intervenções, como neste trabalho, para avaliar a necessidade de manutenção das estruturas ao longo do tempo.

Além disso, é essencial analisar as mudanças nos níveis de água e sedimentos nas bacias de retenção, não só para definir estratégias eficazes de conservação do solo, mas também garantir a qualidade da água e promover a sustentabilidade destes recursos. Alguns dos indicativos da necessidade de realizar a manutenção corretiva é o acúmulo prolongado de água e o extravasamento em condições anormais, como durante chuvas de baixa intensidade e curta duração.

Adicionalmente, as faixas de vegetação funcionam como barreiras ao transporte de sedimentos e favorecem a infiltração da água no solo, uma vez que promovem o aumento da matéria orgânica e a redução da densidade aparente, levando ao aumento de sua condutividade hidráulica (Bracken & Croke, 2007; Bargués-Tobella et al., 2024; Dutal & Reis, 2020). Pode funcionar, ainda, como dissipadora da energia do escoamento superficial, o que resulta em maior tempo de oportunidade para os processos de infiltração e deposição de sedimentos.

A área estudada tinha como principal função o pastoreio de bovinos, tendo sido, assim, desmatada em grande proporção (Figura 3C). Ao lado da estrada que margeia a área de pastagem, havia faixa de vegetação nativa, que pode ter contribuído para um menor aporte de sedimentos à B3, B5 e B7, mas não de maneira relevante.

Condutividade Hidráulica do Solo Saturado e Resistência à Penetração

Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado e as médias de resistência à penetração nas bacias de retenção estudadas, bem como em área de preservação (AP) adjacente, podem ser vistos na Tabela 4.

Conforme observado, a maior condutividade hidráulica do solo saturado foi obtida para B4, seguida de B2. Ambas estavam localizadas em área de pastagem. Já as menores condutividades hidráulicas do solo saturado foram verificadas nas bacias B9 e B1, localizadas em área

de estrada, para as quais foram observadas maiores amplitudes e valor máximo de nível de sedimentos, bem como relevante amplitude de lâmina de água acumulada (Figura 4A e 4C). Entre as variáveis relacionadas à dinâmica da água no solo, a condutividade hidráulica do solo saturado se destaca, pois exerce influência significativa sobre o comportamento hidrológico de uma bacia por atuar na regulação dos padrões de infiltração e na formação de escoamento superficial (Almeida et al., 2018a)

Em pastagens, a cobertura vegetal e a atividade biológica mantêm uma boa estrutura do solo, formando poros bem conectados. A abundância de matéria orgânica melhora a agregação do solo, resultando em alta porosidade e menor compactação, fatores contribuem para o

aumento da Ksf. Em contraste, as estradas sofrem compactação extrema devido ao tráfego de veículos, reduzindo o tamanho e a conectividade dos poros. Além disso, a construção de estradas remove a camada superior do solo e compacta as camadas subjacentes, criando uma estrutura alterada e praticamente impermeável (Falk et al., 2024; Kargas et al., 2021).

Vê-se, então que, neste contexto, a determinação da capacidade de infiltração e da condutividade hidráulica dos solos é fundamental na solução de problemas relativos à função hidrológica destas estruturas de conservação do solo e da água, sendo um indicativo de necessidade de manutenção preventiva, ou até mesmo, corretiva.

Tabela 4. Condutividade hidráulica do solo saturado e médias de resistência à penetração (0 – 40 cm) nas bacias de retenção estudadas, bem como em área de preservação (AP) adjacente.

Local	Kfs (mm/h)	RP (MPa)
B1	0,83	1,09 g
B2	1,46	2,51 d
B3	1,11	1,41 e
B4	1,59	4,74 a
B5	1,02	3,74 c
B6	0,96	4,57 b
B7	0,99	1,25 f
B8	0,89	4,52 b
B9	0,80	1,18 f
AP	1,03	1,35 e

Em que: B – bacia de retenção de água e sedimentos; AP – área de preservação; Kfs – condutividade hidráulica; RP: resistência à penetração. Médias de resistência à penetração, seguidas por mesma letra, não diferem significativamente pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade estatística. diferenças significativas entre tratamentos.

Foram detectadas diferenças significativas de resistência à penetração (Tabela 4). O maior valor médio foi obtido em B4, onde não se teve um nível de água e sedimentos acumulados relevantes, já que estava localizada em área de pastagem e, portanto, não recebeu contribuição do canal de drenagem do escoamento superficial da estrada. Assim, com este resultado, pôde-se determinar que, durante sua construção, esta pode ter tido seu fundo compactado excessivamente, talvez com o objetivo de acumulação de água para dessedentação de animais.

De forma geral, nas bacias da área de pastagem foi verificada uma maior resistência à penetração média em comparação com as bacias da área de estrada. Um outro detalhe importante, é que, com o maior aporte de sedimentos às bacias da área de estrada, há a possibilidade de acúmulo de solo com estrutura solta, o que levaria a menores valores de resistência à penetração nas camadas mais superficiais da área de fundo das estruturas – nas bacias B1 e B9, foram medidas alturas de sedimentos próximas à 30 cm (Figura 4C), sendo a resistência à penetração média avaliada até a profundidade de 40 cm.

Em B3 e na AP, os valores médios de resistência à penetração foram iguais aos medidos nas bacias B7 e B9. A menor resistência à penetração média foi obtida na bacia B1, em que se teve um grande aporte de sedimentos, como já discutido, e nível de água acumulado, o que faz com que o solo esteja mais úmido. A resistência à penetração é uma medida que descreve a força física que o solo exerce sobre uma raiz tentando se mover ao longo de seu perfil. Essa resistência é diretamente influenciada pela densidade aparente, pela porosidade e, principalmente, pela umidade do solo: quanto menor a umidade, maior a resistência deste à penetração (Braidá et al., 2010; Dornelas & Thebaldi, 2016).

Quando o solo está com baixa umidade, a água está mais tensionada nos poros. Essa tensão, combinada com as forças de coesão e adesão entre as partículas, resulta em maior resistência à deformação ou penetração das raízes. Com o aumento do teor de água, a coesão entre as partículas do solo e o atrito interno diminuem, reduzindo, assim, a resistência à penetração (Bartzen et al., 2019; Dias et al., 2023). De fato, em geral, na camada de 0 – 30 cm foi encontrada uma umidade do solo superior em comparação às demais bacias de retenção, e com valores mais uniforme entre camadas (Tabela 2).

O perfil de resistência à penetração, até a profundidade de 40 cm, no interior das bacias de retenção, nos pontos externos adjacentes e em área de preservação podem ser vistos na Figura 5.

O valor máximo obtido de resistência à penetração nas áreas externas, adjacentes às bacias de retenção, foi de aproximadamente 6,0 Mpa, entre 15 e 20 cm de profundidade, para B6A. Já para o interior das bacias de retenção, obteve-se valor próximo de 12 MPa em B4, entre 25 e 30 cm. Valores pontuais, maiores que 6 Mpa, também foram verificados em B2, B5, B6 e B8 (Figura 5B). Alguns autores consideram valores de resistência à penetração acima de 2,0 MPa prejudiciais ao desenvolvimento de plantas (Arruda et al., 2021; Suzuki et al., 2022).

A camada de sedimentos monitorada em B4 foi de 5 cm (Figura 4C) e, ao observar seu perfil de resistência à penetração, houve aumento acentuado a partir de 20 cm (Figura 5C). Adicionalmente, a umidade do solo medida no fundo desta estrutura não foi, em média, relevantemente inferior às demais, assim, este comportamento pode ser devido à excessiva compactação de fundo no momento de sua execução. Há de se refletir, então, dois aspectos: a necessidade de atenção e experiência por parte do profissional responsável pela execução da obra, bem como acompanhamento técnico, já que o grande objetivo destas estruturas é propiciar a infiltração; e a possibilidade de compactação excessiva de forma intencional, para acúmulo e dessedentação animal, o que pode ser demandado pelos produtores rurais, mas não seria interessante do ponto de vista hidrológico.

Nas bacias B1, B3, B7, B9 obteve-se a resistência à penetração baixa em todo o perfil (Figura 5B), tendo estas recebido mais influxo de água e aporte de sedimentos no período amostral, iniciado aproximadamente três anos após a execução das obras, indicando um acúmulo pregresso de sedimentos. Como esperado, na área preservada também foram obtidos valores menores no perfil, o que reforça que a resistência à penetração verificada no interior das bacias de retenção, foi amplamente correlacionada ao aporte de sedimentos.

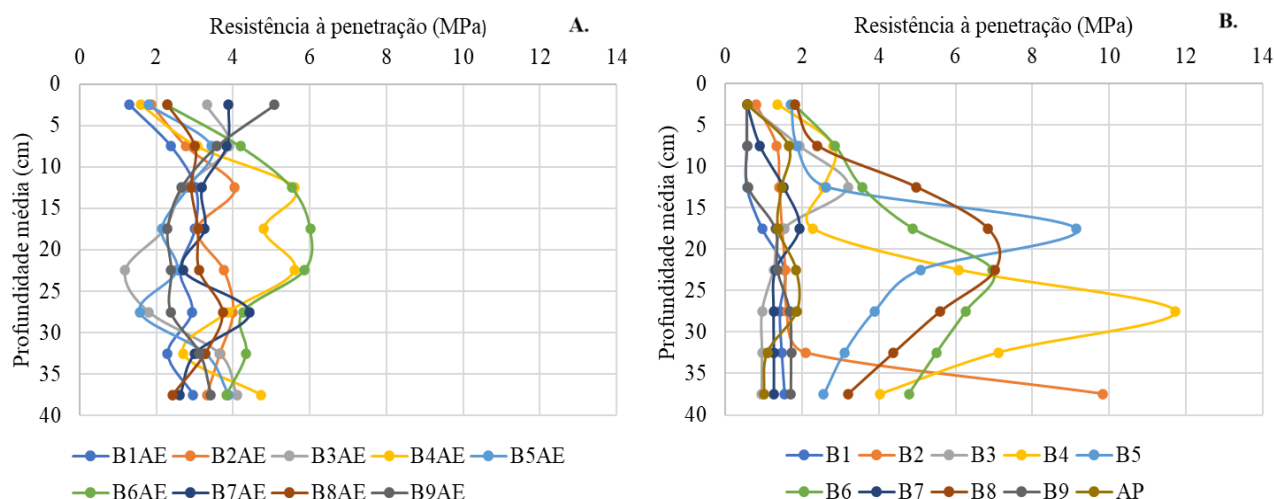


Figura 5. Perfil de resistência à penetração, na camada de 0 até 40 cm, na área externa adjacente às bacias de retenção de água e sedimentos (A), no interior destas e em área de preservação (B) Em que: B – bacia de retenção de água e sedimentos; AE – área externa adjacente às bacias de retenção de água e sedimentos; AP – área preservada.

Conclusão

A metodologia utilizada mostrou-se sensível em diagnosticar as alterações no nível de água e a quantidade de sedimentos nas bacias de retenção. As situadas em área de estrada receberam maior aporte de água e de sedimentos quando comparadas às localizadas em área de pastagem.

As bacias em áreas de pastagem apresentaram maiores valores de condutividade hidráulica do solo saturado, indicando uma boa capacidade de infiltração, enquanto as próximas à estrada obtiveram menores valores. A resistência à penetração, por sua vez, foi maior nas áreas de pastagem em comparação às bacias próximas à estrada, sugerindo diferenças significativas na compactação do solo entre os diferentes ambientes.

Os resultados obtidos evidenciaram, sobretudo, a necessidade da implantação de um sistema de monitoramento contínuo das condições do solo nas bacias de retenção, levando em consideração a compactação do solo e o controle de sedimentos para otimizar a função destas estruturas.

Por fim, os valores observados de condutividade hidráulica do solo saturado e resistência à penetração podem ser considerados indicativos da necessidade de manutenção regular das bacias de retenção, visando o aumento da capacidade infiltração de água e redução da compactação do solo.

Agradecimentos

À Coordenação de Pessoal de Nível Superior - CAPES (código de financiamento 001), por fomentar os programas de pós-graduação em

Chicri, T. S. L., Caminha, A. R., Cavalcanti, R. S., Thebaldi, M. S., Oliveira, L. R., Silva, V. A.

Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental do IFMG - Campus Bambuí e em Recursos Hídricos da UFLA.

Referências

- Almeida, K. S. S. A. de, Souza, L. D. S., Paz, V. P. D. S., Silva, F. T. D. S., Santos, D. N., & Pereira, J. D. S. L. (2018a). Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em latossolo amarelo distrocoeso, no município de Cruz Das Almas. *IRRIGA*, 22(2), 259–274. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p259-274>
- Almeida, W. S., Panachuki, E., de Oliveira, P. T. S., da Silva Menezes, R., Sobrinho, T. A., & de Carvalho, D. F. (2018b). Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 175, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>
- Aragão, V. R., Souza, A. C. S. de, Paoliello, T., Silva, T. G., & Lima, F. A. (2019). Identificação de áreas aptas a barraginhas na Bacia do Rio São Lamberto. *Holos Environment*, 19(2), 304. <https://doi.org/10.14295/holos.v19i2.12328>
- Arruda, A. B., Souza, R. F. de, Brito, G. H. M., Moura, J. B. de, Oliveira, M. H. R. de,

- Santos, J. M. dos, & Dutra e Silva, S. (2021). Resistance of soil to penetration as a parameter indicator of subsolation in crop areas of sugar cane. *Scientific Reports*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91186-3>
- Baird, J. B., Winston, R. J., & Hunt, W. F. (2020). Evaluating the hydrologic and water quality performance of novel infiltrating wet retention ponds. *Blue-Green Systems*, 2(1), 282–299. <https://doi.org/10.2166/bgs.2020.010>
- Bargués-Tobella, A., Winowiecki, L. A., Sheil, D., & Vågen, T.-G. (2024). Determinants of Field-Saturated Soil Hydraulic Conductivity Across Sub-Saharan Africa: Texture and Beyond. *Water Resources Research*, 60(e2023WR035510). <https://doi.org/10.1029/2023WR035510>
- Bartzen, B. T., Hoelscher, G. L., Ribeiro, L. L. O., & Seidel, E. P. (2019). How the Soil Resistance to Penetration Affects the Development of Agricultural Crops? *Journal of Experimental Agriculture International*, 30(5), 1–17. <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/46589>
- Basche, A. D., & DeLonge, M. S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS ONE*, 14(9), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- Basham, D. L., Zech, W., Donald, W., & Whitman, J. (2024). Evaluating Sediment Removal Efficiency of Catch Basin Inserts as a Post-Construction Water Quality Tool on Roadways. *Water (Switzerland)*, 16, 1081. <https://doi.org/10.3390/w16081081>
- Bracken, L. J., & Croke, J. (2007). The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrol. Process.*, 21, 1749–1763. <https://doi.org/10.1002/hyp.6313>
- Braida, J. A., Reichert, J. M., Reinert, D. J., & Veiga, M. da. (2010). Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(2), 131–139. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000200003>
- Bronstert, A., Niehoff, D., & Schiffler, G. R. (2023). Modelling infiltration and infiltration excess: The importance of fast and local processes. *Hydrological Processes*, 37(4), 1–20. <https://doi.org/10.1002/hyp.14875>
- Carvalho, F., Confessor, J. G., & Rodrigues, S. C. (2021). Utilização de simulador de chuvas para determinação do valor CN e abstração inicial na cultura do café em ambiente de cerrado brasileiro. *Physis Terrae - Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente*, 2(2), 101–126. <https://doi.org/10.21814/physisterrae.3083>
- Dadalto, G. G., Paye, H. de S., Comério, A., & Batista, R. (2016). Tecnologias de conservação e armazenamento de água em propriedades rurais. *Incaper Em Revista*, 6(7), 42–50.
- Dias, P. M. S., Portela, J. C., Gondim, J. E. F., Batista, R. O., Rossi, L. S., Medeiros, J. L. F., Farias, P. K. P., Mota, P. J., Bandeira, D. J. da C., Filho, L. C. de A. L., de Matos, G. X., Mesquita, F. de O., de Oliveira, F. O., Araújo, A. G. R., & do Nascimento, C. M. (2023). Soil Attributes and Their Interrelationships with Resistance to Root Penetration and Water Infiltration in Areas with Different Land Uses in the Apodi Plateau, Semiarid Region of Brazil. *Agriculture (Switzerland)*, 13(10), 1–24. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101921>
- Dornelas, M. A., & Thebaldi, M. S. (2016). Investigação da compactação do solo em áreas sob integração lavoura-pecuária e preservação permanente. *Engenharia Na Agricultura*, 23(3), 219–228. <https://doi.org/10.13083/reveng.v24i3.652>

- Dutal, H., & Reis, M. (2020). Determining the effects of land use on soil erodibility in the Mediterranean highland regions of Turkey: a case study of the Korsulu stream watershed. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8155-z>
- El-Mufleh, A., Béchet, B., Ruban, V., Legret, M., Clozel, B., Barraud, S., Gonzalez-Merchan, C., Bedell, J. P., & Delolme, C. (2014). Review on physical and chemical characterizations of contaminated sediments from urban stormwater infiltration basins within the framework of the French observatory for urban hydrology (SOERE URBIS). *Environmental Science and Pollution Research*, 21(8), 5329–5346. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2490-3>
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2017). *Manual de métodos de análise de solo*.
- Falk, D., Winowiecki, L. A., Vågen, T. G., Lohbeck, M., Ilstedt, U., Muriuki, J., Mwaniki, A., & Bargués Tobella, A. (2024). Drivers of field-saturated soil hydraulic conductivity: Implications for restoring degraded tropical landscapes. *Science of the Total Environment*, 907(168038), 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168038>
- Fernandes, L. F. S., Pereira, M. G., Morgado, S. G., & Macário, E. B. (2018). Influence of climate change on the design of retention basins in northeastern Portugal. *Water (Switzerland)*, 10(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/w10060743>
- Fiener, P., Auerswald, K., & Weigand, S. (2005). Managing erosion and water quality in agricultural watersheds by small detention ponds. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 110(3-4), 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.03.012>
- Gomes, N. M., Faria, M. A. de, Silva, A. M. da, Mello, C. R. de, & Viola, M. R. (2007). Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(4), 427–435. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662007000400013>
- Gonçalves, A. D. M. de A., & Libardi, P. L. (2013). Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(5), 1174–1184. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500007>
- Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., & Mueller, C. (2015). A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. *Science of the Total Environment*, 524–525, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.027>
- Hmaied, A., Podwojewski, P., Gharnouki, I., Chaabane, H., & Hammecker, C. (2024). Evaluation of Soil Hydraulic Properties in Northern and Central Tunisian Soils for Improvement of Hydrological Modelling. *Land*, 13(3), 1–17. <https://doi.org/10.3390/land13030385>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022). *Cidades - Formiga*.
- IDE-SISEMA. Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. (2024). *Webgis*.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. (2024). *Mapa de estações*.
- Karahan, G., & Pachepsky, Y. (2022). Parameters of infiltration models affected by the infiltration measurement technique and land-use. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 46(e0210147), 1–14. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210147>

- Kargas, G., Londra, P. A., & Sotirakoglou, K. (2021). Saturated hydraulic conductivity measurements in a loam soil covered by native vegetation: Spatial and temporal variability in the upper soil layer. *Geosciences (Switzerland)*, 11(2), 1–8. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020105>
- Kouyi, G. L., Barraud, S., Becouze-Lareure, C., Blaha, D., Perrodin, Y., Wiest, L., Aubin, J.-B., Toussaint, J.-Y., Vareilles, S., Mandon, C., Bernardin-Souibgui, C., Marti, R., Bourgeois, É., Marjolet, L., & Cournoyer, B. (2018). Caractérisation des sédiments d'un bassin de retenue-décantation des eaux pluviales et éléments pour la gestion. *Techniques Sciences Méthodes*, 9, 65–75. <https://doi.org/10.1051/tsm/201809065>
- Lotfalian, M., Parsakhoo, A., Kavian, A., & Hosseini, S. A. (2013). Runoff and sediment concentration of different parts of a road in Hyrcanian forests. *Forest Science and Practice*, 15(2), 144–151. <https://doi.org/10.1007/s11632-013-0212-z>
- Martins, F. B., Gonzaga, G., Santos, D. F. dos, & Reboita, M. S. (2018). Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22, 149–164. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>
- Masetti, M., Pedretti, D., Sorichetta, A., Stevenazzi, S., & Bacci, F. (2016). Impact of a Storm-Water Infiltration Basin on the Recharge Dynamics in a Highly Permeable Aquifer. *Water Resources Management*, 30(1), 149–165. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1151-3>
- Mendonça, L. A. R., Vásquez, M. A. N., Feitosa, J. V., Oliveira, J. F. de, Franca, R. M. da, Vásquez, E. M. F., & Frischkorn, H. (2009). Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 14(1), 89–98. <https://doi.org/10.1590/S1518-87462009000100010>
- Mesele, H., Grum, B., Aregay, G., & Berhe, G. T. (2024). Evaluation and comparison of infiltration models for estimating infiltration capacity of different textures of irrigated soils. *Environmental Systems Research*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00356-5>
- Minh, T. X., Lei, G., & Tu Oanh, H. T. (2018). Study on the water infiltration and retention of soil after shifting cultivation in Nghe An province, Vietnam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 186(3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/186/3/012022>
- MoayeriKashani, M., Hin, L. S., & Ibrahim, S. (2017). Experimental investigation of fine sediment deposition using particle image velocimetry. *Environmental Earth Sciences*, 76(19), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7001-2>
- Naba, W., & Wolde, B. (2023). Techniques for Conservation Tillage under 15–25% Slope: Soil and Water Conservation, Maize Yield and Yield Components in Basketo Zone, Southern Ethiopia. *OMO International Journal of Sciences*, 6(1), 68–80. <https://doi.org/10.59122/13439yxz>
- Nascimento, G. E. F., Borges, L. C., Lima, B. H. A. (2020). Controle de escoamento pluvial em meio urbano: Um estudo no Município de Santa Rita – Paraíba. *Revista Científica Multidisciplinar - Núcleo do Conhecimento*, 1, 108–146.
- Nazari, S., Hassanlourad, M., Chavoshi, E., & Mirzaei, A. (2018). Experimental Investigation of Unsaturated Silt-Sand Soil Permeability. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/4946956>
- Nogueira, V. H. B., Diotto, A. V., Thebaldi, M. S., Colombo, A., Silva, Y. F., Lima, E. M. de C., & Resende, G. F. L. (2021). Variation in the flow rate of drip emitters

- in a subsurface irrigation system for different soil types. *Agricultural Water Management*, 243, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106485>
- Owuor, S. O., Butterbach-Bahl, K., Guzha, A. C., Rufino, M. C., Pelster, D. E., Díaz-Pinés, E., & Breuer, L. (2016). Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. *Ecological Processes*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s13717-016-0060-6>
- Peixoto, R. de A. O., Pereira, C. E., Salla, M. R., Alamy Filho, J. E., & Nishimura, A. (2020). Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 25(6), 921–931. <https://doi.org/10.1590/s1413-4152202020180137>
- PVNRF. (2018). Programa Vida Nova Rio Formiga. Fundação Educacional de Formiga.
- Reynolds, W. D., Elrick, D. E., & Topp, G. C. (1983). A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science*, 136(4), 250–268. <https://doi.org/10.1097/00010694-198310000-00008>
- Ribeiro, K. D., Borges, J. P. A., & Fernandes, D. F. (2022). Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Alto Rio Formiga, município de Formiga, Minas Gerais. *Disciplinarum Scientia - Ciências Naturais e Tecnológicas*, 23(2), 171–186. <https://doi.org/10.37779/nt.v23i2.4171>
- Robinson, M., Scholz, M., Bastien, N., & Carfrae, J. (2010). Classification of different sustainable flood retention basin types. *Journal of Environmental Sciences*, 22(6), 898–903. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2010.05.011>
- SAAE. (2018). Serviço Autônomo de Água e Esgoto.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos, Oliveira, Virlei Álvaro de Lumberras, José Francisco Coelho, Maurício Rizzato Almeida, J. A. de, Araújo Filho, J. C. de, Oliveira, J. B. de, & Ferreira, T. J. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. In *Embrapa Solos* (5th ed.). Embrapa.
- Seleznev, A., Yarmoshenko, I., Malinovsky, G., Kiseleva, D., Ilgasheva, E., Ryanskaya, A., & Teterin, A. (2019). Surface stormwater runoff in the formation of contemporary urban surface deposited sediments. *E3S Web of Conferences*, 98, 0–4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199807028>
- Silva, C. V., Heller, L., & Carneiro, M. (2012). Cisternas para armazenamento de água de chuva e efeito na diarreia infantil: um estudo na área rural do semiárido de Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 17(4), 393–400. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522012000400006>
- Srivastava, S., Basche, A., Traylor, E., & Roy, T. (2023). The efficacy of conservation practices in reducing floods and improving water quality. *Frontiers in Environmental Science*, 11(May), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1136989>
- Stolf, R. (1991). Theory and test of formulas for transforming impact penetrometer data in soil resistance. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 15, 229–235.
- Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Alves, M. C., & Reichert, J. M. (2022). Critical Limits for Soybean and Black Bean Root Growth, Based on Macroporosity and Penetrability, for Soils with Distinct Texture and Management Systems. *Sustainability (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052958>

Wang, Y., Zhang, J. H., Zhang, Z. H., & Jia, L. Z. (2016). Impact of tillage erosion on water erosion in a hilly landscape. *Science*

of the Total Environment, 551–552(9), 522–532.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.045>