Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Urbana
Curso de Graduação em Engenharia Urbana

Luana Adriano Rocha

PROPOSTA DE SISTEMA SIMPLIFICADO DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA UMA SOLUÇÃO ALTERNATIVA INDIVIDUAL NO MUNICÍPIO DE OURO PRETO, MG

Ouro Preto

2026

Luana Adriano Rocha

Proposta de sistema simplificado de tratamento de água para uma solução alternativa individual no município de Ouro Preto, MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Urbanista.

Orientador: Dr. Paulo de Castro Vieira

Ouro Preto
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R672p Rocha, Luana Adriano.
Proposta de sistema simplificado de tratamento de água para uma solução alternativa individual no município de Ouro Preto, MG. [manuscrito] / Luana Adriano Rocha. - 2026.
81 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Castro Vieira.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Abastecimento de água. 2. Água - Purificação. 3. Água - Purificação - Filtração. 4. Filtração Prévia. I. Vieira, Paulo de Castro. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza -CRB6/2322

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Luana Adriano Rocha

Proposta de um sistema simplificado de tratamento de água para uma solução alternativa individual no município de Ouro Preto - MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Urbanista

Aprovada em 28 de julho de 2026

Membros da banca

[Doutor] - Paulo de Castro Vieira - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Mestre] - Isabel Francisco de Araújo Reis - Serviço de Água e Esgotos de Mariana - MG
[Engenheira] - Zharry Ribeiro Bueno – Tbretas Consultoria

[Paulo de Castro Vieira], orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/09/2026

Documento assinado eletronicamente por **Paulo de Castro Vieira**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/11/2026, às 19:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **1190387** e o código CRC **E89A442C**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: - www.ufop.br

Dedico este trabalho à minha mãe, Suely Andrade Adriano, que me ensinou a acreditar na universidade pública como caminho de transformação. Foi na sua esperança que aprendi que o conhecimento compartilhado melhora vidas, a começar pela nossa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Pró-Reitoria de Pesquisa (PROP) pela bolsa de Iniciação Científica, à Pró-Reitoria de Extensão (PROEX) pela bolsa de extensão ao longo da minha graduação, ao Laboratório de Saneamento do DECIV pelo apoio técnico e pela infraestrutura disponibilizada, à Universidade Federal de Ouro Preto pela formação pública de excelência e ao meu orientador, o Prof. Paulo Vieira, pelas orientações, incentivo e apoio ao longo desta trajetória, que representou um divisor de águas na minha vida.

Expresso também minha gratidão à Profa. Aline Nunes, à Profa. Bárbara Abreu, ao Prof. Denis Furtado e ao Prof. Christiano Carvalho, pelos ensinamentos que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica e profissional. Admiro a dedicação de cada um à docência e levarei comigo os conhecimentos, os valores e as perspectivas que compartilharam ao longo dessa trajetória.

Meu agradecimento à profissional Paula Elias, que esteve sempre disposta a auxiliar nas atividades práticas deste projeto. À família do Geovane, agradeço por abrir as portas de sua casa e me receber com acolhimento, tornando possível a realização deste estudo.

À minha amiga Zharry Bueno, agradeço por acreditar em mim, pelo apoio constante e por contribuir diariamente para o meu crescimento profissional. Sua presença tornou essa nova etapa muito mais leve e significativa.

À minha irmã, Gabriella Neto, agradeço por caminhar ao meu lado em todas as aulas e atividades da Urbana, compartilhando desafios, aprendizados e conquistas ao longo desse percurso.

Por fim, agradeço imensamente ao meu companheiro, Pedro Avelar, pelo cuidado, amparo, paciência, conselhos e incentivo constantes. Sua presença foi essencial nos momentos de dificuldade e de conquista, oferecendo apoio tanto na minha vida pessoal quanto no caminho acadêmico.

Que a Escola de Minas continue formando profissionais, inspirando sonhos e ampliando o conhecimento científico. Viva o ensino público!

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1– Sistema de Abastecimento Isolado.....15

Figura 3-2 – Sistema de Abastecimento Integrado.....16

Figura 3-3 – Etapas do tratamento em ciclo completo.....17

Figura 3-4 – Principais mananciais e formas de captação utilizados em soluções alternativas de abastecimento.....20

Figura 3-5 – Requisitos de uma tecnologia apropriada para o saneamento.....26

Figura 3-6 - Impurezas geralmente presentes em águas superficiais.....38

Figura 3-7 - Formação da schmutzdecke na superfície do leito filtrante de um filtro lento em areia.....41

Figura 4-1 – Mapa de localização da área de estudo bairro Nossa Senhora do Carmo. 46

Figura 4-2 – Imagem de satélite com a localização da nascente utilizada e a residência do estudo (registro em julho de 2026).....47

Figura 4-3 - Configuração geral do sistema simplificado de tratamento de água.....50

Figura 5-1 - Caracterização da qualidade da água da nascente durante o período de monitoramento (maio de 2025 a junho de 2026).....56

Figura 5-2 - Caracterização da qualidade da água da nascente após evento pluviométrico (monitoramento de 8 horas).....58

Figura 5-3 – Resultado da leitura da microplaca para quantificação de coliformes totais e Escherichia coli na água.....59

Figura 5-4 – Distribuição dos valores de turbidez da água da nascente nos períodos seco e chuvoso.....60

Figura 5-5 – Distribuição dos valores de cor aparente da água da nascente nos períodos seco e chuvoso.....61

Figura 5-6 – Configuração das unidades de tratamento da Linha 1.....68

Figura 5-7 – Configuração das unidades de tratamento da Linha 2.....69

Figura 5-8 – Configuração do clorador de pastilhas.....71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 – Principais tecnologias simplificadas aplicáveis ao tratamento domiciliar da água em soluções alternativas individuais.....24

Tabela 3-2 - Níveis de acesso à água e necessidades humanas atendidas em função da disponibilidade hídrica.....29

Tabela 3-3 - Principais parâmetros utilizados na avaliação da qualidade da água destinada ao consumo humano.....32

Tabela 5-1 – Demanda diária de projeto.....62

Tabela 5-2 – Produção nominal das linhas de tratamento.....63

Tabela 5-3 – Resultado do dimensionamento hidráulico.....64

Tabela 5-4 – Profundidade dos leitos filtrantes.....64

Tabela 5-5 – Quantitativos dos materiais filtrantes.....65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....12

2 OBJETIVO.....14

2.1 Objetivo Geral.....14

2.2 Objetivos Específicos.....14

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....14

3.1 Sistema de abastecimento de água.....14

3.2 Soluções alternativas individuais de abastecimento de água.....17

3.2.1 Principais mananciais empregados em soluções alternativas individuais de abastecimento.....20

3.2.2 Tecnologias propostas.....22

3.3 Dimensionamento dos sistemas simplificados de tratamento da água.....28

3.3.1 Demanda hídrica.....28

3.3.2 Condições de qualidade da água destinada ao consumo humano.....31

3.3.3 Taxas de filtração aplicadas ao tratamento da água.....34

3.4 Tecnologias simplificadas empregadas no tratamento da água.....36

3.4.1 Pré-filtração dinâmica.....37

3.4.2 Filtração lenta em areia.....40

3.4.3 Emprego do carvão antracito como meio filtrante.....42

3.4.4 Desinfecção por cloração.....43

4 METODOLOGIA.....45

4.1 Área de estudos.....45

4.2 Caracterização da qualidade de água....48
4.3 Configuração do sistema proposto....49
4.4 Dimensionamento do sistema....50
5 RESULTADOS....56
5.1 Caracterização da qualidade da água....56
5.2 Parâmetros de projeto e configuração do sistema....61
5.2.1 Demanda diária de projeto....61
5.2.2 Área filtrante e produção das linhas....62
5.2.3 Verificação da área e do diâmetro mínimos....62
5.2.4 Profundidade dos leitos filtrantes....63
5.2.5 Quantidade de materiais filtrantes....64
5.3 Configuração das unidades de tratamento....66
6 CONCLUSÃO....71
7 PROPOSTA PARA ESTUDOS POSTERIORES....73
REFERÊNCIAS....75

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água potável e ao saneamento básico é um direito humano fundamental, reconhecido pela Organização das Nações Unidas (ONU) e estabelecido como o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 6, que visa à universalização do acesso à água segura até 2030 (ONU, 2010). No Brasil, este direito é regulamentado pela Política Nacional de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007), atualizada pelo Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), que estabelece a meta de garantir o abastecimento de água potável para 99% da população até 2033 (Instituto Trata Brasil, 2025).

Para alcançar essa meta, a legislação tornou obrigatória a elaboração dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) como condição para o acesso a recursos federais. Em Ouro Preto, essa diretriz se materializou no PMSB de 2013, que visa proteger a saúde pública e melhorar a gestão do abastecimento (PMOP, 2013). Contudo, conforme aponta Carneiro (2025), a existência do plano, por si só, não garantiu o acesso universal à água tratada, evidenciando uma lacuna significativa entre o planejamento formal e a realidade de parte da população.

É nesse contexto que a Portaria GM/MS nº 888, de 2021, se torna um instrumento central, ao estabelecer os padrões de qualidade que toda água destinada ao consumo humano deve atender (Brasil, 2021). Conforme destacado por Carneiro (2025), para as localidades onde os sistemas convencionais de abastecimento são inexistentes ou inviáveis, a própria legislação prevê a adoção de soluções alternativas individuais de abastecimento, desde que atendidos os requisitos sanitários estabelecidos.

Nesse cenário, os sistemas simplificados de tratamento de água são constituídos pela associação de unidades de menor complexidade construtiva e operacional, organizadas de modo a promover, de forma sequencial, a remoção ou redução dos contaminantes presentes na água (Heller; Pádua, 2008). Seu funcionamento baseia-se na atuação complementar das diferentes etapas de tratamento, que podem compreender pré-tratamento, filtração e desinfecção, conforme as características da água a ser tratada e a configuração adotada (Di Bernardo et al., 2017).

O abastecimento em Ouro Preto é marcado por uma forte disparidade territorial. Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022) evidenciam esse contraste: enquanto a cobertura de abastecimento de água tratada na área urbana atinge 97,3%, o índice geral do município indica que 15,3% da população, o que corresponde a aproximadamente 11.429 pessoas, permanecem sem acesso à rede pública de abastecimento.

Essa estatística demonstra que o déficit de abastecimento está concentrado majoritariamente fora do perímetro urbano, onde a população frequentemente recorre a fontes alternativas de água, como poços e nascentes. A ausência de tratamento adequado pode tornar a água um importante vetor para a transmissão de contaminantes biológicos, como bactérias, vírus e protozoários, além de compostos químicos potencialmente nocivos, incluindo metais pesados e agrotóxicos. A ingestão ou o contato com água contaminada representa, portanto, um significativo risco à saúde pública, estando diretamente associada à ocorrência de diversas doenças de veiculação hídrica, como cólera, febre tifoide, hepatite A e outras infecções gastrointestinais (Amaral et al., 2003).

Considerando esse contexto, torna-se necessária a busca por alternativas tecnicamente viáveis, economicamente acessíveis e compatíveis com a realidade das soluções alternativas individuais de abastecimento. A adoção de sistemas simplificados de tratamento de água apresenta potencial para ampliar o acesso à água segura em localidades onde a implantação de sistemas convencionais é limitada, desde que adequadamente dimensionados e avaliados quanto aos seus aspectos técnicos, operacionais e econômicos.

Neste contexto, o presente trabalho propõe duas alternativas simplificadas de tratamento de água para aplicação em uma solução alternativa individual de abastecimento localizada no município de Ouro Preto, MG. As alternativas propostas foram dimensionadas a partir da demanda hídrica estimada da residência estudada e avaliadas sob os aspectos técnicos e econômicos, buscando discutir seu potencial de aplicação em condições semelhantes às consideradas neste estudo.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Propor, dimensionar e avaliar técnica e economicamente duas alternativas simplificadas de tratamento de água para aplicação em uma solução alternativa individual de abastecimento no município de Ouro Preto, MG.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a demanda hídrica da residência estudada para fins de abastecimento doméstico.
- Caracterizar as condições de qualidade da água bruta proveniente da solução alternativa individual de abastecimento.
- Propor duas alternativas simplificadas de tratamento de água compatíveis com as características da residência estudada.
- Dimensionar as unidades constituintes das alternativas propostas com base nos critérios técnicos adotados no estudo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

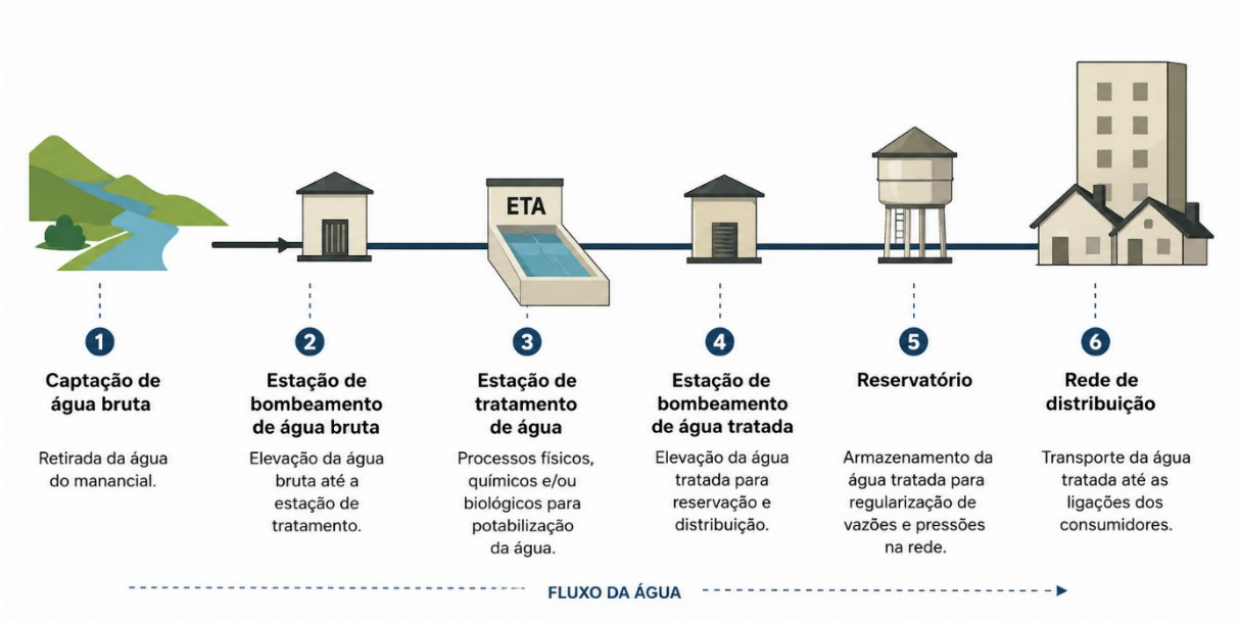
3.1 Sistema de abastecimento de água

O Sistema de Abastecimento de Água (SAA) compreende o conjunto de infraestruturas, instalações operacionais e atividades necessárias ao abastecimento público de água potável, abrangendo desde a captação até as ligações prediais e os respectivos instrumentos de medição (BRASIL, 2007).

A implantação dos sistemas públicos de abastecimento tende a ser empregada em regiões com maior densidade populacional, pois a proximidade entre os usuários reduz a extensão relativa das redes de distribuição e contribui para a diminuição dos custos por habitante atendido. Além disso, esses sistemas favorecem maior controle operacional e sanitário da água fornecida, constituindo uma solução tecnicamente indicada para o abastecimento de grandes populações e para a proteção da saúde pública (FUNASA, 2006).

Quanto à abrangência, os sistemas públicos de abastecimento de água podem ser classificados em sistemas isolados ou integrados (ANA, 2021). O sistema isolado destina-se ao abastecimento de um único município e dispõe de infraestrutura própria de captação, tratamento, reservação e distribuição. Conforme ilustrado na Figura 3-1, esse tipo de sistema opera de forma independente, sem interligação com outros sistemas de abastecimento.

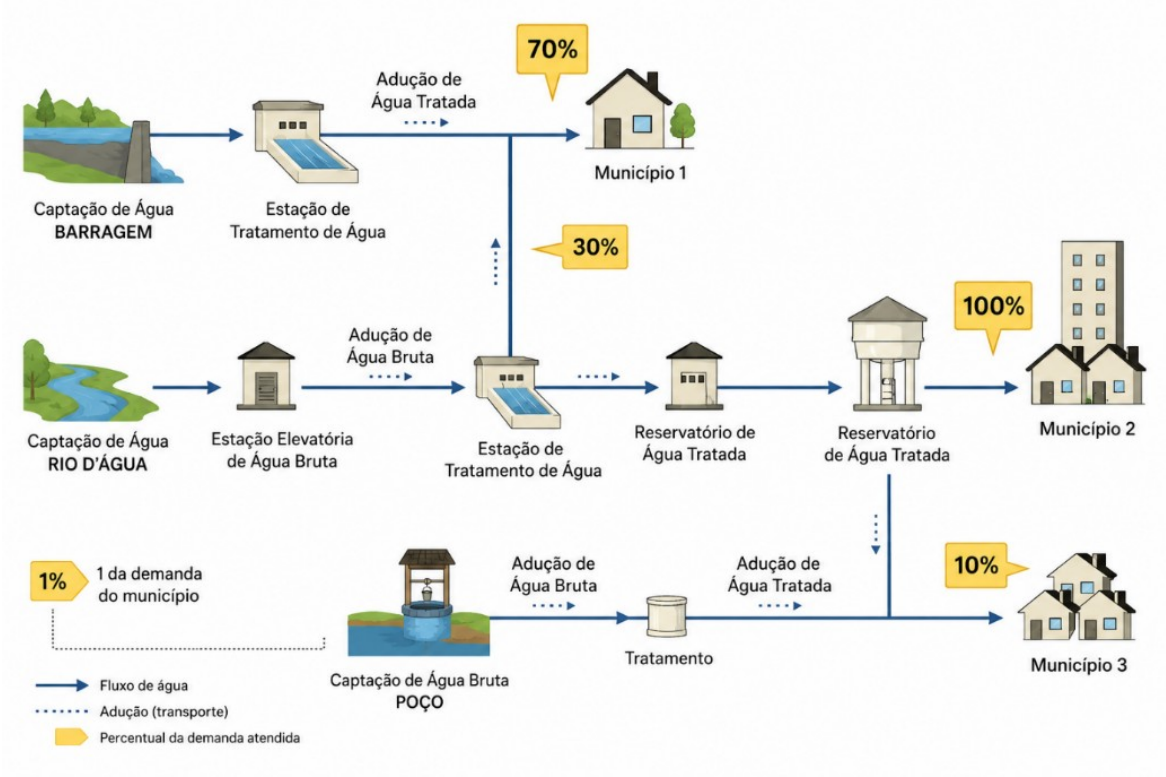
Figura 3-1– Sistema de Abastecimento Isolado.



Fonte: Adaptado pela autora, com auxílio de IA, a partir de ANA (2021).

Por sua vez, o sistema integrado é planejado para atender simultaneamente dois ou mais municípios por meio de uma infraestrutura compartilhada. Como apresentado na Figura 3-2, esses sistemas podem utilizar um ou mais mananciais e compartilhar diferentes unidades do sistema de abastecimento, permitindo o fornecimento de água a diferentes municípios de forma integrada (ANA, 2021).

Figura 3-2 – Sistema de Abastecimento Integrado.

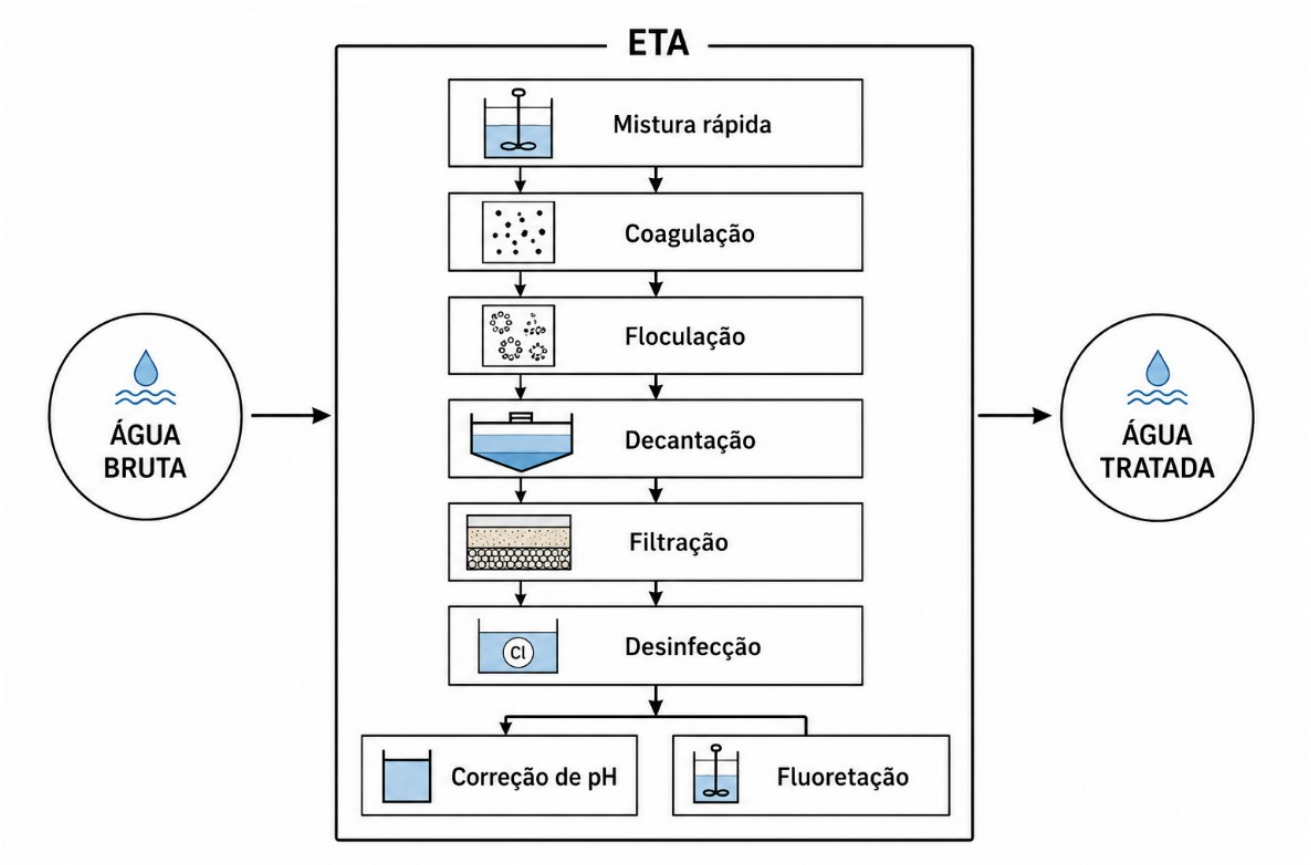


Fonte: Adaptado pela autora, com auxílio de IA, a partir de ANA (2021).

Independentemente da configuração adotada, os sistemas públicos de abastecimento são compostos por um conjunto de unidades destinadas à captação, ao tratamento, à reservação e à distribuição da água, cuja complexidade varia em função das características do manancial e da população atendida. Entre essas unidades, destaca-se a Estação de Tratamento de Água (ETA), responsável pela aplicação dos processos necessários à adequação da qualidade da água bruta para o consumo humano.

Entre as tecnologias empregadas no abastecimento público, destaca-se o tratamento em ciclo completo, cujo processo, esquematizado na Figura 3-3 promove a remoção de partículas e microrganismos por meio de uma sequência de etapas. Inicialmente, a coagulação e a floculação favorecem, respectivamente, a desestabilização e a aglomeração das partículas presentes na água, formando flocos que são posteriormente removidos na etapa de decantação. Em seguida, a água é submetida à filtração e, posteriormente, à desinfecção, destinada à inativação dos microrganismos patogênicos que ainda permanecem na água (HELLER; PÁDUA, 2008).

Figura 3-3 – Etapas do tratamento em ciclo completo.



Fonte: Adaptado por IA pela autora de ANA, 2015.

A qualidade da água deve ser acompanhada ao longo de todo o sistema de abastecimento, mediante o monitoramento de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, conforme estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Esse controle é realizado por meio de coletas em pontos definidos no plano de amostragem aplicável e não se restringe à saída da Estação de Tratamento de Água, permitindo verificar a manutenção da qualidade da água até sua disponibilização aos consumidores (BRASIL, 2021).

3.2 Soluções alternativas individuais de abastecimento de água

O acesso à água em quantidade suficiente e qualidade adequada constitui uma condição à vida, à saúde e à dignidade humana. Em reconhecimento a essa importância, a Assembleia Geral das Nações Unidas, por meio da Resolução nº 64/292, reconheceu explicitamente o direito à água potável e ao saneamento como um direito humano essencial. No Brasil, a qualidade da água destinada ao consumo

humano é regulamentada pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água, bem como o padrão de potabilidade a ser atendido.

O acesso à água destinada ao consumo humano pode ocorrer por diferentes modalidades de abastecimento, cuja definição depende das características da população atendida, da disponibilidade hídrica local e das condições técnicas, econômicas e operacionais para sua implantação. Dessa forma, a adoção de sistemas convencionais ou de soluções alternativas de abastecimento deve considerar não apenas a disponibilidade da água, mas também a garantia de sua qualidade e segurança sanitária.

Sob a perspectiva tecnológica, a definição do tratamento da água deve considerar as características do corpo hídrico e do ambiente em que ele está inserido. Di Bernardo et al. (1999) destacam que existe uma relação direta entre o meio ambiente e a tecnologia de tratamento adotada, visto que a qualidade da água bruta, as necessidades da comunidade atendida e as condições de operação e manutenção influenciam a definição dos processos necessários para sua potabilização. A escolha da alternativa mais adequada depende da avaliação conjunta desses fatores, realizada por meio de análises laboratoriais, inspeções sanitárias, ensaios e estudos de viabilidade.

Além das diferenças relacionadas à escala e à infraestrutura, as modalidades de abastecimento também se distinguem quanto à responsabilidade por sua gestão e operação. Enquanto os sistemas públicos são gerenciados por prestadores responsáveis pelo fornecimento de água à população, as soluções alternativas podem envolver a atuação de comunidades, associações ou dos próprios usuários, a depender da modalidade adotada (REZENDE; HELLER, 2008).

Os sistemas públicos de abastecimento predominam em áreas urbanas, onde a maior concentração populacional favorece a implantação e a operação de redes de distribuição. Em contrapartida, as soluções alternativas são mais frequentes em localidades não atendidas pela rede pública, nas quais fatores como população dispersa, limitações de infraestrutura e custos de expansão podem dificultar o atendimento por sistemas convencionais (FUNASA, 2006).

Independentemente da modalidade de abastecimento adotada, a água destinada ao consumo humano deve atender ao padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que define os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água e estabelece requisitos aplicáveis aos sistemas de abastecimento de água e às soluções alternativas coletivas e individuais.

Diante dos desafios relacionados à universalização do acesso à água potável e dos elevados custos associados à implantação e à expansão dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), são adotadas soluções alternativas destinadas ao atendimento de populações situadas em áreas não contempladas pela rede pública de distribuição ou onde sua implantação se mostra técnica ou economicamente inviável (DI BERNARDO et al., 1999).

De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, as soluções alternativas de abastecimento podem ser classificadas como coletivas (SAC) ou individuais (SAI). A solução alternativa coletiva corresponde à modalidade de abastecimento coletivo destinada ao fornecimento de água potável sem rede de distribuição, enquanto a solução alternativa individual destina-se ao abastecimento de domicílio residencial ocupado por uma única família, incluindo seus agregados familiares (BRASIL, 2021).

A diversidade de configurações possíveis permite que determinadas soluções alternativas sejam desenvolvidas com materiais de fácil obtenção e menor custo, como tubos, conexões e reservatórios de PVC. Essa característica pode favorecer sua aplicação em contextos com limitações financeiras, desde que os materiais e as tecnologias empregados sejam compatíveis com as características da água bruta e com as necessidades de tratamento (CARNEIRO et al., 2025).

Além dos aspectos construtivos, a escolha da modalidade de abastecimento deve considerar fatores como a disponibilidade hídrica local, as condições de implantação, operação e manutenção dos sistemas e as características da população atendida. Dessa forma, uma mesma solução pode apresentar desempenhos distintos quando aplicada em contextos diferentes, evidenciando a importância da adequação das tecnologias empregadas às condições locais (HELLER; PÁDUA, 2008).

Considerando que as soluções alternativas individuais podem utilizar diferentes fontes de abastecimento, torna-se necessário compreender as características dos

principais mananciais empregados nessas modalidades, apresentados na subseção seguinte.

3.2.1 Principais mananciais empregados em soluções alternativas individuais de abastecimento

De modo geral, quanto à origem, as fontes de água utilizadas para abastecimento podem ser agrupadas em águas superficiais, subterrâneas e pluviais (FUNASA, 2006). As formas de captação e aproveitamento desses mananciais variam de acordo com suas características e com as condições locais. Entre as possibilidades estão o aproveitamento de águas pluviais e nascentes, a captação de águas subsuperficiais por meio de galerias filtrantes, o acesso ao lençol freático por poços escavados rasos, a captação em aquíferos profundos por poços tubulares e a captação direta de mananciais superficiais. As principais formas de aproveitamento empregadas em soluções alternativas de abastecimento são apresentadas na Figura 3-4.

Figura 3-4 – Principais mananciais e formas de captação utilizados em soluções alternativas de abastecimento.



Fonte: Adaptado pela autora, com auxílio de IA, a partir de FUNASA (2006).

Considerando que a solução alternativa individual avaliada neste trabalho utiliza uma nascente como fonte de abastecimento, torna-se necessário compreender suas principais características e as condições associadas ao seu aproveitamento. Associadas à descarga natural das águas subterrâneas na superfície do terreno, essas feições constituem uma forma de acesso às águas subterrâneas. Sua utilização, entretanto, requer uma avaliação que não se limite à disponibilidade da água, devendo considerar aspectos como o tipo de nascente, a vazão, a qualidade da água e as condições sanitárias e ambientais da área de recarga (HELLER; PÁDUA, 2008).

No contexto do município de Ouro Preto, as nascentes também integram a estrutura local de abastecimento da população. Roman et al. (2025) identificaram 49 nascentes na sede urbana do município e, com base nos dados do Censo Demográfico de 2022, destacaram a permanência do uso de fontes naturais pela população. Do total de domicílios particulares permanentemente ocupados, 563, correspondentes a 3,7%, declararam utilizar fontes, nascentes ou minas para o abastecimento. Esses dados evidenciam que o aproveitamento dessas águas permanece presente na realidade local e reforçam a necessidade de compreender suas características e limitações quando empregadas para consumo humano.

Entre 2003 e 2023, a área urbanizada no interior das Áreas de Preservação Permanente (APPs) das nascentes do município aumentou aproximadamente 26,7%. Além disso, das 49 nascentes mapeadas, 20, correspondentes a 41%, estão localizadas fora das Zonas de Proteção Ambiental previstas no zoneamento municipal. Essa situação demonstra que a expansão urbana alcançou áreas legalmente protegidas e evidencia uma incompatibilidade entre a localização de parte das nascentes e a delimitação das zonas municipais de proteção ambiental (ROMAN et al., 2025).

As nascentes não devem, portanto, ser compreendidas apenas como pontos isolados de afloramento da água subterrânea. Felippe e Magalhães Junior (2013) as caracterizam como sistemas ambientais complexos e heterogêneos, que não se limitam ao ponto de afloramento da água. Moura e Felippe (2022) ampliam essa compreensão ao considerar a interação entre fatores externos, como clima, relevo, sociedade e aquíferos, e componentes internos, como água, morfologia, ecossistema

e materiais presentes no local. Dessa forma, alterações na cobertura vegetal, no uso e na ocupação do solo e nas condições do entorno podem afetar sua estrutura, funcionalidade e conservação.

A ocupação do entorno das nascentes pode aumentar a vulnerabilidade do manancial à contaminação. Sistemas inadequados de esgotamento sanitário, atividades desenvolvidas nas áreas de recarga, manejo inadequado do solo e o acesso de animais às proximidades da captação constituem fatores que podem introduzir matéria orgânica e microrganismos na água (FUNASA, 2017). Nessas condições, o aproveitamento de nascentes para abastecimento deve ser acompanhado da proteção do manancial, do monitoramento da qualidade da água e da adoção de tecnologias compatíveis com suas características. Dessa forma, a proposição de soluções simplificadas de tratamento da água requer a caracterização prévia do manancial utilizado, considerando aspectos relacionados à disponibilidade hídrica e à qualidade da água destinada ao consumo humano.

3.2.2 Tecnologias propostas

Diante dos desafios relacionados à universalização do acesso à água potável e dos elevados custos associados à implantação e expansão dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), são adotadas soluções alternativas. Essas modalidades constituem estratégias destinadas a atender populações situadas em áreas não contempladas pela rede pública de distribuição ou onde sua implantação se mostra economicamente inviável (DI BERNARDO et al., 1999).

De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, as soluções alternativas de abastecimento podem ser classificadas como coletivas (SAC) ou individuais (SAI). A solução alternativa coletiva corresponde à modalidade de abastecimento coletivo destinada ao fornecimento de água potável sem rede de distribuição. Já a solução alternativa individual destina-se ao abastecimento de domicílio residencial ocupado por uma única família, incluindo seus agregados familiares (BRASIL, 2021).

A diversidade de configurações possíveis permite que determinadas soluções alternativas sejam desenvolvidas com materiais de fácil obtenção e menor custo, como tubos, conexões e reservatórios de PVC. Essa característica pode favorecer sua aplicação em contextos com limitações financeiras, desde que os materiais e as

tecnologias empregados sejam adequados às características da água e às necessidades de tratamento (CARNEIRO et al., 2025). As principais tecnologias simplificadas descritas na literatura para aplicação em soluções alternativas individuais de abastecimento são apresentadas na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 – Principais tecnologias simplificadas aplicáveis ao tratamento domiciliar da água em soluções alternativas individuais.

TECNOLOGIA	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	MATERIAIS	REFERÊNCIAS
Filtração lenta domiciliar em areia	Filtração em meio granular de areia para remoção de partículas e parte dos microrganismos.	Baixa taxa de filtração; boa eficiência para turbidez e redução microbiológica; recomenda-se desinfecção complementar.	Limpeza periódica da superfície do leito e controle da vazão.	Areia, pedregulho, recipiente filtrante e tubulações.	Maciel (2018); Freitas et al. (2022); Oliveira (2021).
Filtração em múltiplas etapas (FiME)	Associação de pré-filtração e filtração lenta para melhorar o desempenho do tratamento.	Reduz a carga de sólidos e aumenta a eficiência da filtração lenta.	Limpeza periódica das unidades filtrantes.	Pré-filtro, filtro lento, meios granulares e conexões.	Medeiros et al. (2020); Di Bernardo, Brandão e Heller (1999).
Filtração cerâmica	Filtração por elemento cerâmico poroso.	Remove partículas, bactérias e protozoários; pode incorporar prata coloidal.	Limpeza da vela e substituição quando necessário.	Filtro cerâmico e reservatório.	Oliveira (2021); WHO (2011).
Cloração	Desinfecção química por compostos à base de cloro	Elevada eficiência microbiológica e manutenção de cloro residual; não remove turbidez.	Controle da dosagem e reposição do cloro.	Hipoclorito ou pastilhas de cloro e reservatório.	Oliveira (2021); Moura (2021).
Desinfecção solar (SODIS)	Exposição da água à radiação solar em recipientes	Baixo custo; indicada para pequenos volumes e águas de	Limpeza e substituição periódica das garrafas.	Garrafas PET transparentes.	Moura (2021); Oliveira (2021).

TECNOLOGIA	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO	MATERIAIS	REFERÊNCIAS
	transparentes.	baixa turbidez.			
Fervura	Desinfecção térmica da água por ebulição.	Alta eficiência microbiológica; não remove contaminantes químicos.	Aquecimento e armazenamento adequado da água tratada.	Fonte de calor e recipiente.	Moura (2021); Oliveira (2021).
Sachê floculante-desinfetante	Combina coagulação, floculação e desinfecção em um único produto.	Indicado para águas com maior turbidez; reduz partículas e microrganismos.	Exige preparo conforme instruções do fabricante.	Sachê e recipientes para mistura.	Oliveira (2021); WHO (2013).

Fonte: Autora, 2025

As tecnologias apresentadas na Tabela 3-1 empregam diferentes mecanismos de tratamento, podendo combinar processos físicos, químicos e biológicos de acordo com os objetivos de cada sistema. Entre esses mecanismos, destacam-se a retenção de partículas em meios filtrantes e, em determinadas tecnologias, a atuação de processos biológicos associados à atividade microbiana desenvolvida no meio filtrante. A contribuição de cada mecanismo depende da configuração do sistema, das características dos materiais empregados e das condições de operação (DI BERNARDO et al., 1999).

Nesse contexto, a escolha de uma tecnologia para o abastecimento e o tratamento da água não deve considerar apenas aspectos como custo, segurança e eficiência. A solução adotada também deve ser compatível com as condições locais e com a população atendida. Segundo a proposta da UNICEF (1978), apresentada por Heller (2006), uma tecnologia apropriada para o saneamento deve atender a um conjunto de requisitos, conforme apresentado na Figura 3-5.

Figura 3-5 – Requisitos de uma tecnologia apropriada para o saneamento.



Fonte: Adaptado por IA pela autora de UNICEF, 1978.

Esses requisitos evidenciam que a adequação de uma tecnologia não depende exclusivamente de seu desempenho técnico, mas também de sua compatibilidade com os recursos disponíveis, manutenção e o contexto social e cultural em que será

inserida. Dessa forma, uma mesma solução pode apresentar resultados distintos quando aplicada em realidades diferentes, o que reforça a necessidade de considerar as particularidades locais durante sua seleção e implantação (HELLER; PÁDUA, 2008).

Nesse sentido, a participação da população pode contribuir para a implantação e a continuidade das soluções alternativas de abastecimento. A realização de reuniões, oficinas e outras atividades participativas permite integrar o conhecimento técnico à experiência dos moradores, considerando as necessidades e as condições locais. Esse processo pode favorecer a compreensão sobre a qualidade da água, a proteção das fontes de abastecimento e os cuidados necessários à operação e à manutenção das soluções implantadas, contribuindo também para ampliar a autonomia da população em sua gestão (TENÓRIO et al., 2023).

A aceitação das tecnologias adotadas também pode ser influenciada pela forma como a população percebe a água e os riscos associados ao seu consumo, bem como por suas experiências e práticas cotidianas. Nesse sentido, Wutich et al. (2017) destacam que as experiências relacionadas à insegurança hídrica são influenciadas por fatores socioculturais, incluindo estruturas sociais, valores compartilhados e significados atribuídos à água. Além da adequação ao contexto local, a seleção de uma tecnologia pode envolver a comparação entre diferentes alternativas, considerando seus benefícios, limitações, custos e compatibilidade com a realidade em que serão aplicadas. Essa avaliação fornece subsídios para a escolha da solução mais apropriada às condições de abastecimento e tratamento da água (HELLER; PÁDUA, 2008).

Considerando os critérios técnicos, operacionais e construtivos discutidos ao longo deste capítulo, o presente estudo adotou uma configuração composta pela associação entre pré-filtração dinâmica, filtração em meio granular e desinfecção por cloração para o tratamento da água destinada ao consumo humano. A seleção dessas tecnologias foi realizada de forma integrada, buscando compatibilizar as características do manancial utilizado, a demanda hídrica estimada, as condições operacionais requeridas por cada unidade de tratamento e sua aplicação em soluções alternativas individuais de abastecimento. O sistema proposto foi concebido a partir da associação entre diferentes processos físicos e químicos complementares, de modo a

promover a remoção progressiva dos contaminantes presentes na água bruta e produzir água compatível com os padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação vigente.

3.3 Dimensionamento dos sistemas simplificados de tratamento da água

O dimensionamento de sistemas simplificados de tratamento da água requer a definição prévia de critérios compatíveis com as características do manancial utilizado, a demanda hídrica da população atendida e as condições operacionais das tecnologias empregadas. A adequada caracterização desses aspectos influencia diretamente a seleção dos processos de tratamento, das taxas de operação adotadas e das dimensões das unidades filtrantes. Dessa forma, a proposição de soluções alternativas individuais de abastecimento pressupõe o conhecimento da demanda hídrica, das condições de qualidade da água destinada ao consumo humano e das taxas de filtração aplicáveis às tecnologias selecionadas, aspectos abordados nas subseções seguintes (HELLER; PÁDUA, 2008; DI BERNARDO et al., 1999).

3.3.1 Demanda hídrica

A demanda hídrica corresponde ao volume de água necessário para atender às necessidades da população em determinado intervalo de tempo, constituindo um dos principais parâmetros empregados no dimensionamento dos sistemas de abastecimento e tratamento da água (HELLER; PÁDUA, 2008). Sua estimativa influencia diretamente a definição das vazões de projeto e das condições operacionais das unidades empregadas no sistema, devendo ser compatibilizada com as características da população atendida e com os objetivos estabelecidos para o abastecimento (FUNASA, 2019).

No ambiente doméstico, a água é empregada para consumo, preparo dos alimentos, higiene pessoal, limpeza da residência, lavagem de roupas e demais atividades cotidianas. Dependendo das características da moradia e da região onde está inserida, sua utilização pode ainda contemplar atividades complementares, como irrigação de pequenas hortas e cuidados com animais (WHO, 2003). Considerando a relação entre disponibilidade hídrica e atendimento das necessidades humanas, a

Organização Mundial da Saúde propõe diferentes níveis de acesso à água associados às condições mínimas necessárias para assegurar o consumo e a higiene pessoal.

Conforme apresentado na Tabela 3-2, menores disponibilidades de água restringem o atendimento das necessidades humanas básicas e estão associadas ao aumento dos riscos à saúde, enquanto maiores disponibilidades permitem assegurar progressivamente melhores condições sanitárias e de higiene (WHO, 2003).

Tabela 3-2 - Níveis de acesso à água e necessidades humanas atendidas em função da disponibilidade hídrica.

Nível e serviço	Forma de acesso à água	Necessidades atendidas	Risco à saúde
Sem acesso (quantidade coletada inferior a 5 L/hab.dia)	Distância superior a 1.000 m ou tempo total de coleta superior a 30 minutos	• Consumo: não pode ser assegurado. • Higiene: não é possível, exceto quando realizada diretamente na fonte de água.	Muito alto
Acesso básico (quantidade média geralmente não superior a 20 L/hab.dia)	Distância entre 100 e 1.000 m ou tempo total de coleta entre 5 e 30 minutos	• Consumo: deve ser assegurado. • Higiene: é possível realizar a lavagem das mãos e a higiene básica dos alimentos; banho e lavagem de roupas dificilmente podem ser garantidos, exceto quando realizados na fonte de água.	Alto
Acesso intermediário (quantidade média em torno de 50 L/hab.dia)	Água fornecida por uma torneira no lote ou a menos de 5 minutos de tempo total de coleta	• Consumo: assegurado. • Higiene: todas as necessidades básicas de higiene pessoal e dos alimentos são atendidas; banho e lavagem de roupas também podem ser realizados.	Baixo

Nível e serviço	Forma de acesso à água	Necessidades atendidas	Risco à saúde
Acesso ótimo (quantidade média igual ou superior a 100 L/hab.dia)	Água fornecida continuamente por múltiplas torneiras	• Consumo: todas as necessidades são atendidas. • Higiene: todas as necessidades de higiene podem ser plenamente atendidas.	Muito baixo

Fonte: Adaptado pela autora de WHO, 2003.

Conforme essa classificação, a determinação da demanda hídrica residencial deve considerar simultaneamente o nível de serviço pretendido e as necessidades da população atendida, uma vez que a quantidade de água disponibilizada influencia diretamente as atividades domésticas que podem ser adequadamente atendidas. Guedes, Ribeiro e Vieira (2014) destacam que a compreensão dos padrões de consumo constitui um dos elementos considerados no planejamento dos sistemas de abastecimento. Em complemento, Dias, Libânio e Martinez (2014) observaram que aspectos socioeconômicos e características regionais exercem influência significativa sobre as diferenças verificadas no consumo domiciliar de água. Esses resultados evidenciam a necessidade de compatibilizar as estimativas de demanda hídrica com as características específicas da população atendida, de modo que as vazões adotadas sejam representativas das condições de utilização previstas para cada realidade.

Diante dessa variabilidade, torna-se necessário adotar critérios que permitam representar quantitativamente a demanda hídrica para fins de planejamento e dimensionamento. Entre os indicadores mais empregados destaca-se o consumo per capita, expresso em litros por habitante por dia (L/hab.dia), que relaciona a demanda diária ao número de usuários atendidos. Conforme proposto pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2003), disponibilidades médias próximas de 50 L/hab.dia são consideradas suficientes para assegurar o atendimento das necessidades humanas básicas relacionadas ao consumo e à higiene, enquanto maiores disponibilidades permitem atender progressivamente outras atividades domésticas. Entretanto, Heller (2006) ressalta que a estimativa da demanda hídrica deve ser

compatibilizada com as características específicas da população abastecida, não sendo adequada a adoção de valores padronizados para todas as situações.

Após a estimativa da demanda hídrica, torna-se possível estabelecer os parâmetros necessários ao dimensionamento das estruturas que compõem o sistema de abastecimento. Nesse sentido, Di Bernardo et al. (1999) ressaltam que a definição das vazões adotadas influencia diretamente as condições operacionais das unidades de tratamento da água, constituindo um dos principais parâmetros considerados em seu dimensionamento.

3.3.2 Condições de qualidade da água destinada ao consumo humano

Segundo Di Bernardo et al. (1999), a qualidade da água não representa uma característica absoluta, mas um conceito diretamente relacionado ao uso a que ela se destina. Partindo desse entendimento, Brito et al. (2007) explicam que sua qualidade resulta do conjunto de características físicas, químicas e microbiológicas presentes no manancial, bem como dos efeitos que elas podem exercer sobre a saúde humana e o meio ambiente. No contexto do abastecimento humano, sua caracterização permite avaliar a adequação da água aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação vigente e fornece os parâmetros necessários para a seleção dos processos de tratamento compatíveis com as características do manancial utilizado.

A avaliação da qualidade da água também está diretamente associada à proteção da saúde pública. Freitas e Freitas (2005) destacam que a vigilância da água destinada ao consumo humano permite identificar situações de risco e orientar ações preventivas voltadas à redução das doenças de veiculação hídrica. A ingestão de água contaminada por bactérias, vírus, protozoários e outros microrganismos patogênicos constitui uma via de transmissão de enfermidades como diarreias infecciosas, cólera, febre tifoide, hepatite A, giardíase e criptosporidiose, frequentemente associadas à contaminação microbiológica da água. Nessas condições, o monitoramento contínuo dos parâmetros de qualidade constitui um dos instrumentos empregados para verificar a adequação sanitária da água produzida e reduzir os riscos associados ao seu consumo.

No Brasil, os padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano são estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que dispõe sobre os

procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água aplicáveis aos sistemas de abastecimento e às soluções alternativas coletivas e individuais. A normativa estabelece critérios microbiológicos, físicos e químicos empregados na avaliação da água produzida, incluindo valores máximos permitidos, frequências mínimas de monitoramento e parâmetros operacionais destinados à verificação do desempenho dos processos de tratamento (BRASIL, 2021). Entre os principais parâmetros empregados destacam-se a turbidez, a cor aparente, o potencial hidrogeniônico (pH), o cloro residual livre, os coliformes totais e a Escherichia coli, além de variáveis complementares, como temperatura e condutividade elétrica, frequentemente utilizadas na caracterização das condições do manancial e do comportamento dos sistemas de tratamento.

A Tabela 3-3 apresenta os principais parâmetros empregados na avaliação da qualidade da água destinada ao consumo humano, seus respectivos valores de referência estabelecidos pela legislação vigente e sua contribuição para a caracterização das condições sanitárias e operacionais da água produzida.

Tabela 3-3 - Principais parâmetros utilizados na avaliação da qualidade da água destinada ao consumo humano.

PARÂMETRO	FAIXA PERMITIDA	TIPO	IMPORTÂNCIA PARA AVALIAÇÃO
Turbidez	≤ 5,0 uT	Físico	Indica a presença de partículas em suspensão e auxilia na avaliação da eficiência do tratamento.
Cor	≤ 15 UH	Físico	Valores elevados podem indicar matéria orgânica dissolvida e metais.
Temperatura	Não possui VMP	Físico	Temperaturas altas influencia reações químicas, proliferação microbiológica e eficiência da desinfecção.
Condutividade elétrica	Não possui VMP	Químico	Indicador indireto da concentração de sais dissolvidos.
pH	6,0–9,5	Químico	Influencia a eficiência da desinfecção e processos de corrosão e incrustação.
Cloro residual livre	≥0,2 e ≤5,0 mg/l	Químico	Mantém a desinfecção e reduz o risco de recontaminação.
Coliformes totais	Ausência em 100 mL*	Microbiológico	Indicador das condições higiênico-sanitárias do sistema.

PARÂMETRO	FAIXA PERMITIDA	TIPO	IMPORTÂNCIA PARA AVALIAÇÃO
Escherichia coli	Ausência em 100 mL	Microbiológico	Principal indicador de contaminação fecal recente.

* Os critérios para Coliformes Totais variam conforme o tipo e o porte do sistema, conforme estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Para fins deste estudo, adotou-se a ausência em 100 mL como referência de qualidade para água destinada ao consumo humano.

Fonte: Portaria GM/MS nº 888/2021.

Embora apresentados individualmente, os parâmetros empregados na avaliação da qualidade da água devem ser interpretados de forma integrada, uma vez que refletem diferentes aspectos relacionados à adequação da água ao consumo humano. Parâmetros físicos, como turbidez e cor aparente, permitem avaliar a presença de partículas em suspensão, matéria orgânica e a eficiência dos processos empregados no tratamento. Segundo a Organização Mundial da Saúde, elevados valores de turbidez podem comprometer a eficiência dos processos de desinfecção ao promoverem a proteção física dos microrganismos presentes na água, reduzindo a efetividade da ação dos agentes desinfetantes empregados no tratamento (WHO, 2017).

Por sua vez, parâmetros químicos, como o pH e o cloro residual livre, influenciam diretamente as condições operacionais adotadas durante a desinfecção, enquanto os parâmetros microbiológicos são empregados na avaliação da segurança sanitária da água produzida (BRASIL, 2021). Variáveis complementares, como temperatura e condutividade elétrica, auxiliam na caracterização das condições do manancial, podendo indicar alterações em sua composição e contribuir para a avaliação do desempenho das unidades de tratamento (BRITO et al., 2007).

Características como elevadas concentrações de sólidos suspensos, variações significativas de turbidez e a presença de indicadores microbiológicos podem demandar a associação entre diferentes processos de tratamento para assegurar a produção de água compatível com os padrões exigidos para o consumo humano. Segundo a Organização Mundial da Saúde, a utilização do conceito de múltiplas barreiras constitui uma das estratégias empregadas para aumentar a efetividade operacional dos sistemas de abastecimento, reduzindo a dependência do

desempenho isolado de uma única unidade de tratamento (WHO, 2017). Nesse contexto, a associação entre processos destinados à remoção física de partículas e unidades complementares de desinfecção permite ampliar a segurança sanitária da água produzida, particularmente em situações nas quais a qualidade do manancial apresenta variações temporais significativas.

A caracterização prévia da qualidade da água também subsidia a seleção das tecnologias empregadas no tratamento. Segundo Di Bernardo et al. (1999), não existe uma única configuração tecnológica capaz de atender satisfatoriamente às diferentes condições apresentadas pelos mananciais utilizados para abastecimento humano, tornando necessária a compatibilização entre as características da água afluente e os processos empregados em seu tratamento. Esse entendimento é reforçado por Medeiros et al. (2020), ao demonstrar que o desempenho dos sistemas simplificados está diretamente associado às características da água submetida ao tratamento e às condições operacionais sob as quais as tecnologias são empregadas. Dessa forma, parâmetros relacionados à qualidade da água fornecem subsídios técnicos para a definição das unidades de tratamento, das taxas operacionais empregadas no sistema e da necessidade de associação entre diferentes processos destinados à produção de água compatível com os padrões de potabilidade estabelecidos para o consumo humano.

3.3.3 Taxas de filtração aplicadas ao tratamento da água

As taxas de filtração constituem um dos principais parâmetros empregados no dimensionamento das unidades destinadas ao tratamento da água, influenciando diretamente a eficiência dos processos empregados, a capacidade de produção de água tratada e as dimensões das unidades filtrantes. Sua definição deve considerar aspectos relacionados à qualidade do manancial utilizado, à demanda hídrica requerida e às características operacionais das tecnologias empregadas, tornando-se um dos principais critérios utilizados na proposição de sistemas simplificados de tratamento da água (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; HELLER; PÁDUA, 2008).

Diferentes tecnologias empregam distintas faixas de operação, as quais refletem o compromisso entre eficiência do tratamento, simplicidade operacional e capacidade produtiva dos sistemas. Em termos gerais, menores taxas de filtração

favorecem maiores tempos de contato entre a água e o meio filtrante, contribuindo para processos físicos, químicos e biológicos associados à melhoria da qualidade da água. Por outro lado, maiores taxas de operação permitem aumentar a produção de água tratada e reduzir as dimensões das unidades empregadas, podendo demandar a associação entre processos complementares de tratamento para manutenção da eficiência esperada (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Entre as tecnologias simplificadas empregadas no tratamento da água, os filtros lentos destacam-se por sua simplicidade operacional e elevada eficiência na remoção de partículas e microrganismos quando corretamente dimensionados e operados. Segundo Di Bernardo et al. (1999) e Heller e Pádua (2008), esses sistemas são tradicionalmente empregados em águas de melhor qualidade, operando sob baixas taxas de filtração, geralmente compreendidas entre 2 e 6 m^3/m^2.dia (equivalentes a aproximadamente 2 a 6 m/d), podendo alguns sistemas simplificados operar em faixas superiores quando associados a unidades complementares de pré-tratamento. Nessas condições, maiores tempos de contato favorecem tanto a retenção física de partículas quanto os processos biológicos desenvolvidos no meio filtrante, contribuindo para a melhoria da qualidade microbiológica da água produzida.

Apesar das vantagens associadas à filtração lenta, a utilização de baixas taxas de operação implica a necessidade de maiores áreas filtrantes para produção de um mesmo volume de água tratada, constituindo uma das principais limitações relacionadas à sua aplicação. Em contrapartida, tecnologias que operam sob taxas intermediárias de filtração apresentam potencial para compatibilizar maiores capacidades produtivas com reduzidas exigências operacionais, destacando-se como alternativas promissoras para aplicação em sistemas simplificados destinados ao abastecimento individual. Segundo a literatura, sistemas intermediários podem operar em faixas compreendidas entre aproximadamente 12 e 150 m/d, apresentando desempenho dependente das características do manancial utilizado, das tecnologias associadas ao tratamento e das condições operacionais adotadas (DI BERNARDO et al., 1999; FREITAS et al., 2022).

Taxas mais elevadas também são empregadas em sistemas rápidos de tratamento da água, cuja aplicação frequentemente demanda maior controle operacional e a associação entre processos complementares destinados à

manutenção da eficiência do tratamento. Nesses sistemas, aspectos relacionados à qualidade da água bruta assumem particular importância, podendo justificar a necessidade da utilização de unidades preliminares destinadas à redução da carga de sólidos suspensos e à melhoria das condições operacionais das unidades subsequentes (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Além da capacidade produtiva dos sistemas, as taxas de filtração influenciam diretamente parâmetros relacionados à eficiência microbiológica esperada, ao intervalo entre as operações de manutenção, às dimensões das unidades filtrantes e aos custos associados à implantação das tecnologias empregadas. Dessa forma, sua adequada definição constitui uma etapa indispensável do dimensionamento, não podendo ser dissociada das características da água bruta utilizada e dos objetivos estabelecidos para o tratamento proposto. Em soluções alternativas individuais de abastecimento, essa avaliação assume particular importância, uma vez que a compatibilização entre eficiência do tratamento, simplicidade operacional, baixo custo de implantação e facilidade construtiva constitui um dos principais desafios associados à proposição dessas tecnologias (HELLER; PÁDUA, 2008).

Portanto, a seleção das taxas de filtração empregadas no tratamento da água não deve considerar exclusivamente a capacidade de produção requerida pelos sistemas, mas também as limitações e potencialidades associadas às diferentes tecnologias disponíveis. Nesse contexto, a literatura apresenta diversas soluções simplificadas capazes de compatibilizar eficiência do tratamento, baixo custo de implantação e simplicidade operacional, cujas características e aplicações são discutidas no item seguinte.

3.4 Tecnologias simplificadas empregadas no tratamento da água

Os sistemas simplificados de tratamento da água são estruturados pela associação de diferentes unidades operacionais, dispostas em sequência de modo que cada etapa desempenhe funções complementares destinadas à melhoria da qualidade da água produzida. Segundo Heller e Pádua (2008), a concepção desses sistemas fundamenta-se no princípio de múltiplas barreiras, segundo o qual a segurança sanitária da água destinada ao consumo humano depende da atuação integrada de medidas de proteção e tratamento ao longo de todo o sistema, desde a proteção do manancial até o ponto de consumo. Como nenhum processo é capaz de

promover, isoladamente, a remoção de todos os contaminantes potencialmente presentes na água bruta, diferentes tecnologias podem ser empregadas de forma complementar para adequá-la aos padrões de potabilidade vigentes (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

A configuração das linhas de tratamento varia em função das características da água bruta, dos objetivos estabelecidos para o tratamento e das condições de implantação, operação e manutenção dos sistemas propostos. Em soluções alternativas individuais de abastecimento, aspectos relacionados à simplicidade operacional, à disponibilidade dos materiais empregados, aos custos envolvidos e à compatibilização entre demanda hídrica, qualidade da água e taxas de filtração assumem particular importância na seleção das tecnologias utilizadas (HELLER; PÁDUA, 2008). Dessa forma, sistemas simplificados mantêm a organização em etapas sucessivas observada nos sistemas convencionais de tratamento, adaptando as tecnologias empregadas às características do manancial e às condições locais de utilização (OLIVEIRA, 2021).

Dentre as diferentes tecnologias descritas na literatura para aplicação em sistemas simplificados de tratamento da água, a presente revisão concentra-se naquelas compatíveis com os critérios anteriormente apresentados relacionados à qualidade da água, às condições operacionais requeridas e à simplicidade construtiva e operacional dos sistemas propostos. Assim, são discutidos os princípios de funcionamento, mecanismos de atuação, vantagens, limitações, condições recomendadas para sua utilização e aplicações das tecnologias que fundamentam as linhas de tratamento avaliadas neste estudo.

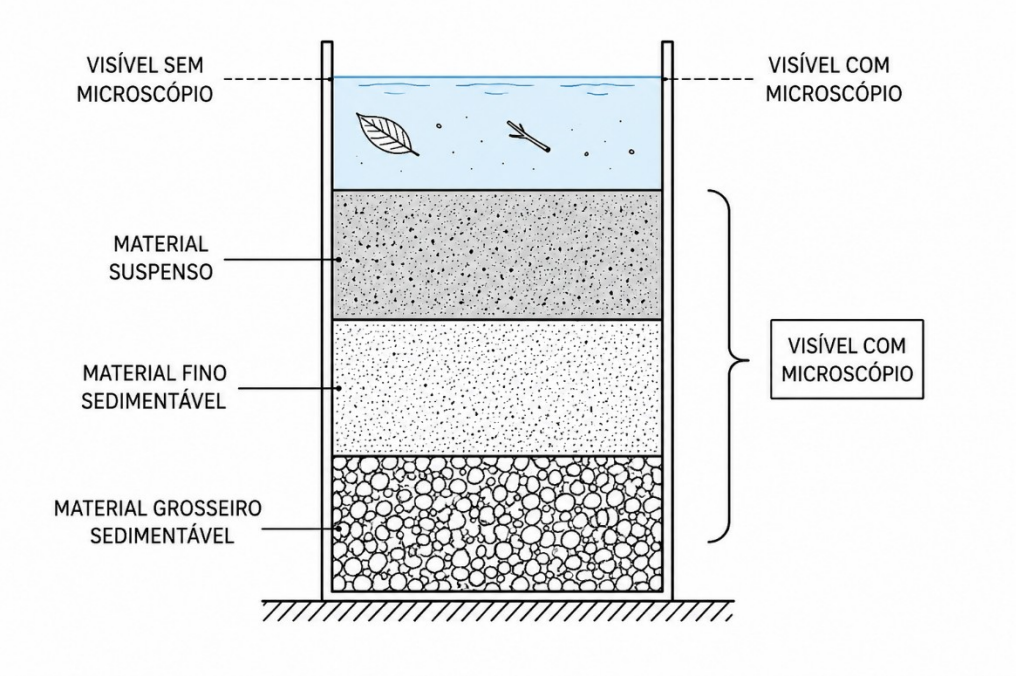
3.4.1 Pré-filtração dinâmica

A pré-filtração dinâmica (PFD) consiste em uma unidade de pré-tratamento empregada para reduzir a carga de sólidos suspensos presentes na água bruta antes das etapas principais de filtração. Seu desenvolvimento está diretamente relacionado à necessidade de ampliar a faixa de aplicação dos sistemas simplificados de tratamento da água em mananciais sujeitos a maiores variações sazonais de qualidade, permitindo melhorar as condições operacionais das unidades filtrantes subsequentes sem comprometer a simplicidade construtiva e operacional desses sistemas (DI BERNARDO et al., 1999).

Em águas superficiais, a presença de diferentes tipos de impurezas influencia diretamente a seleção das tecnologias empregadas no tratamento. Materiais grosseiros, partículas sedimentáveis e sólidos suspensos podem apresentar comportamentos distintos ao longo do tratamento, demandando a associação entre diferentes etapas destinadas à melhoria da qualidade da água produzida. Nesse contexto, tecnologias de pré-tratamento assumem papel fundamental na redução parcial da carga de sólidos encaminhada às unidades filtrantes principais, contribuindo para aumentar a eficiência e a estabilidade operacional do sistema como um todo (DI BERNARDO et al., 1999).

A Figura 3-6 apresenta os principais tipos de impurezas geralmente presentes em águas superficiais, destacando desde materiais grosseiros facilmente perceptíveis até partículas finas e organismos visíveis apenas com auxílio de microscópio. A presença desses constituintes evidencia a necessidade da adequada caracterização do manancial e justifica a utilização de unidades complementares destinadas ao condicionamento prévio da água anteriormente às etapas principais do tratamento.

Figura 3-6 - Impurezas geralmente presentes em águas superficiais.



Fonte: Adaptado pela autora, com auxílio de IA, a partir de Di Bernardo et al. (1999).

Na configuração convencional dos sistemas simplificados de tratamento, a PFD é instalada imediatamente após a captação da água, antecedendo as unidades

responsáveis pela filtração principal. Seu funcionamento baseia-se no emprego de meios granulares de elevada granulometria, através dos quais a água escoa sob baixas perdas de carga, promovendo a remoção parcial das partículas transportadas pelo fluxo. Esse processo ocorre predominantemente por mecanismos físicos de sedimentação, interceptação e aprisionamento das partículas nos vazios do meio filtrante, contribuindo para a redução da carga de sólidos encaminhada às unidades subsequentes do tratamento (DI BERNARDO et al., 1999).

A redução da concentração de sólidos suspensos constitui uma das principais vantagens associadas à utilização da pré-filtração dinâmica. Ao diminuir a carga afluente às unidades filtrantes principais, a tecnologia contribui para aumentar a duração das carreiras de filtração, reduzir a frequência das operações de limpeza e proporcionar maior estabilidade operacional do sistema. Além disso, a PFD atua como uma barreira frente às oscilações da qualidade da água bruta, atenuando os efeitos associados aos picos de turbidez sobre as etapas posteriores do tratamento. Tais características apresentam particular relevância em soluções alternativas individuais de abastecimento, nas quais a simplicidade operacional e a redução das necessidades de manutenção constituem critérios importantes na seleção das tecnologias empregadas (MEDEIROS et al., 2020).

Além das vantagens relacionadas ao desempenho operacional do sistema, a pré-filtração dinâmica apresenta elevada simplicidade construtiva quando comparada às tecnologias convencionais de tratamento da água. Sua implantação pode ser realizada utilizando materiais granulares normalmente disponíveis na região de instalação e, na maioria das aplicações, dispensa a utilização de produtos químicos e equipamentos complexos para sua operação. Segundo Oliveira (2021), essas características contribuem para reduzir os custos associados à implantação e manutenção dos sistemas simplificados de tratamento, favorecendo sua aplicação em pequenas comunidades e soluções individuais de abastecimento.

Apesar das vantagens apresentadas, a pré-filtração dinâmica não constitui uma etapa suficiente para a produção de água potável. Sua função restringe-se ao condicionamento da água destinada às unidades subsequentes do tratamento, sendo indispensável sua associação a processos complementares de filtração e desinfecção para atendimento aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº

888/2021 (BRASIL, 2021). Nesse contexto, a PFD deve ser compreendida como uma unidade complementar destinada a aumentar a robustez operacional dos sistemas simplificados de tratamento, contribuindo para ampliar a eficiência global das linhas de tratamento às quais está associada (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

3.4.2 Filtração lenta em areia

A filtração lenta em areia foi uma das primeiras tecnologias empregadas no tratamento de águas destinadas ao abastecimento público. Introduzida no início do século XIX, sua utilização se expandiu para diversos países em razão da capacidade de produzir água de boa qualidade por meio de processos naturais de tratamento, elevada simplicidade operacional e reduzida necessidade de produtos químicos para sua operação. A EPA (1991) destaca que, mesmo após o desenvolvimento de tecnologias mais complexas, a filtração lenta permaneceu amplamente empregada em sistemas de pequeno porte, sobretudo no tratamento de águas superficiais com características compatíveis. De forma semelhante, Di Bernardo et al. (1999) ressaltam que essa tecnologia continua sendo uma alternativa tecnicamente viável quando associada a condições adequadas de operação.

Nos filtros lentos, a água percola através de um leito constituído por areia fina apoiada sobre camadas de material granular de maior diâmetro, responsáveis pela sustentação do filtro e pela drenagem da água tratada. Segundo a EPA (1991), a operação ocorre sob baixas taxas de filtração, geralmente compreendidas entre 0,1 e 0,4 $m^3/m^2.h$ (aproximadamente 2,4 a 9,6 $m^3/m^2.dia$), proporcionando maior tempo de contato entre a água e o leito filtrante. Essas condições favorecem o desenvolvimento dos processos responsáveis pela remoção das impurezas presentes na água e constituem uma das principais características associadas ao elevado desempenho microbiológico observado nessa tecnologia.

Embora a retenção física das partículas contribua para a melhoria da qualidade da água, a eficiência da filtração lenta resulta da atuação simultânea de diferentes mecanismos físicos, químicos e biológicos. O NEERI (1989) explica que, durante a passagem da água pelo leito filtrante, ocorrem processos de sedimentação, interceptação, adsorção e retenção mecânica das partículas, ao mesmo tempo em que a atividade microbiológica promove a degradação da matéria orgânica e a remoção de microrganismos presentes na água bruta. Dessa forma, o desempenho do

filtro não depende exclusivamente das características da areia empregada, mas da interação contínua entre os diferentes processos desenvolvidos ao longo da operação.

Com o funcionamento contínuo do filtro, forma-se gradualmente uma camada biologicamente ativa na superfície do leito filtrante, denominada schmutzdecke, sendo constituída por microrganismos, matéria orgânica e partículas retidas. À medida que amadurece, sua atividade microbiológica contribui para aumentar a eficiência da remoção de partículas, da degradação de compostos orgânicos e da remoção microbiológica observada no tratamento, razão pela qual sua adequada formação constitui uma etapa importante para o desempenho da tecnologia (NEERI, 1989).

Figura 3-7 - Formação da schmutzdecke na superfície do leito filtrante de um filtro lento em areia.



Fonte: adaptado de Tufts University Engineers Without Borders (2009).

A aplicação da filtração lenta permanece especialmente relevante em sistemas descentralizados de abastecimento da água. Oliveira (2021) destaca que essa tecnologia é frequentemente associada a unidades complementares de tratamento, de acordo com os objetivos estabelecidos para cada sistema. Em sua revisão da literatura, a autora identificou elevadas eficiências na remoção de turbidez e indicadores microbiológicos quando os filtros são corretamente dimensionados e operados, reforçando sua aplicabilidade em soluções destinadas a pequenas comunidades e sistemas simplificados de abastecimento. Além disso, sua associação a tecnologias complementares de pré-tratamento e desinfecção contribui para aumentar a efetividade operacional dos sistemas propostos, particularmente em situações nas quais a qualidade da água bruta apresenta maiores variações temporais.

Apesar das vantagens apresentadas, a filtração lenta demanda maiores áreas filtrantes quando comparada a tecnologias empregadas sob maiores taxas de operação, constituindo uma das principais limitações associadas à sua aplicação. Além disso, elevadas concentrações de sólidos suspensos e grandes variações de turbidez podem acelerar a colmatação superficial do leito filtrante, reduzindo o intervalo entre as operações de manutenção e comprometendo sua estabilidade operacional. Nessas situações, torna-se necessária a adoção de unidades complementares de pré-tratamento capazes de adequar as características da água afluente às condições operacionais requeridas pela tecnologia (DI BERNARDO et al., 1999).

Portanto, embora apresente limitações relacionadas às condições operacionais requeridas para seu adequado funcionamento, a filtração lenta permanece como uma das principais tecnologias empregadas em sistemas simplificados destinados ao tratamento da água para consumo humano. Sua elevada simplicidade operacional, associada à eficiência observada na remoção de contaminantes físicos e microbiológicos e à possibilidade de associação com unidades complementares de tratamento, justificam sua ampla aplicação em soluções descentralizadas de abastecimento de água.

3.4.3 Emprego do carvão antracito como meio filtrante

O carvão antracito é empregado como meio filtrante em filtros multicamadas destinados ao tratamento da água, sendo frequentemente utilizado em associação com a areia em leitos filtrantes de dupla camada. Segundo Logsdon (2011), a utilização de materiais filtrantes com diferentes propriedades físicas permite melhor aproveitamento da profundidade do leito filtrante e constitui uma das estratégias empregadas para ampliar a eficiência operacional das unidades de filtração. Nesse contexto, a associação entre carvão antracito e areia favorece maiores carreiras operacionais quando comparada aos filtros constituídos exclusivamente por areia.

Comparativamente à areia, o carvão antracito apresenta menor massa específica e maior porosidade entre os grãos, características que favorecem maior profundidade de retenção do material particulado ao longo do leito filtrante. Como consequência, reduz-se a concentração de partículas acumuladas superficialmente e desacelera-se a evolução da perda de carga observada durante a operação do filtro

(BRINCK, 2009). Em filtros multicamadas, as diferenças entre a massa específica e a granulometria dos materiais também favorecem a adequada estratificação do leito filtrante após as operações de lavagem, preservando as características hidráulicas necessárias ao desempenho do sistema (LOGSDON, 2011).

As vantagens associadas ao emprego do carvão antracito tem sido observadas em diferentes estudos conduzidos sob distintas condições operacionais. Brinck (2009) verificou menor evolução da perda de carga em filtros constituídos por carvão antracito quando comparados àqueles preenchidos exclusivamente por areia sob as mesmas condições hidráulicas, evidenciando a influência das propriedades físicas do material sobre o desempenho do processo de filtração. Essas características contribuem para aumentar a duração das carreiras operacionais e reduzir a frequência das operações de manutenção realizadas durante a operação do sistema.

Apesar das vantagens apresentadas, o desempenho do carvão antracito depende diretamente da compatibilização entre as características do material empregado, a qualidade da água afluente e as condições operacionais adotadas durante a filtração. Poncio (2023) observou que parâmetros como granulometria do material e taxa de filtração exercem influência significativa sobre a eficiência do processo, evidenciando a necessidade do adequado dimensionamento do leito filtrante em função dos objetivos estabelecidos para o tratamento proposto.

Dessa forma, a utilização do carvão antracito em sistemas simplificados de tratamento da água constitui uma alternativa capaz de ampliar as carreiras de filtração e favorecer melhores condições operacionais quando corretamente dimensionado. Sua associação à areia em filtros multicamadas permite associar eficiência do processo de filtração e menores necessidades de manutenção, características particularmente relevantes em soluções descentralizadas destinadas ao tratamento da água para consumo humano.

3.4.4 Desinfecção por cloração

Segundo Heller e Pádua (2008), a produção de água segura para consumo humano fundamenta-se no princípio das múltiplas barreiras, no qual diferentes processos atuam de forma complementar para reduzir os riscos associados à presença de contaminantes na água. Nesse contexto, a desinfecção constitui a etapa

destinada à inativação dos microrganismos patogênicos que possam permanecer após as etapas anteriores do tratamento, complementando os mecanismos de remoção promovidos pelas demais unidades do sistema.

Entre as tecnologias empregadas para a desinfecção da água destinada ao consumo humano, a cloração apresenta como característica a capacidade de promover a inativação microbiológica e manter residual desinfetante na água após sua aplicação. Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2022), o residual de cloro livre constitui um importante parâmetro operacional empregado para verificar a manutenção da proteção microbiológica da água tratada ao longo do armazenamento e da distribuição. A manutenção desse residual permite conferir proteção adicional frente a eventuais contaminações posteriores ao tratamento, característica particularmente relevante em soluções descentralizadas de abastecimento.

A eficiência do processo de cloração está diretamente relacionada às características da água tratada e às condições operacionais empregadas durante a desinfecção. A Organização Mundial da Saúde recomenda que, para desinfecção efetiva, seja mantida concentração residual de cloro livre igual ou superior a 0,5 mg/L após, pelo menos, 30 minutos de tempo de contato em águas com pH inferior a 8,0. Adicionalmente, recomenda-se a manutenção de concentração residual mínima de 0,2 mg/L no ponto de consumo, de modo a preservar a proteção microbiológica da água após o tratamento.

No contexto nacional, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece que toda água destinada ao consumo humano deve apresentar concentração mínima de cloro residual livre de 0,2 mg/L em toda a extensão do sistema de distribuição e concentração máxima de 5,0 mg/L, constituindo um dos principais parâmetros empregados no controle operacional da desinfecção (BRASIL, 2021). Associado ao monitoramento microbiológico da água tratada, o residual de cloro livre permite verificar a manutenção da proteção microbiológica conferida pelo tratamento e constitui um importante indicador da eficiência operacional do processo de desinfecção.

Dessa forma, a desinfecção por cloração complementa as demais barreiras empregadas no tratamento da água, contribuindo para assegurar a manutenção da qualidade microbiológica da água produzida até o ponto de consumo.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudos

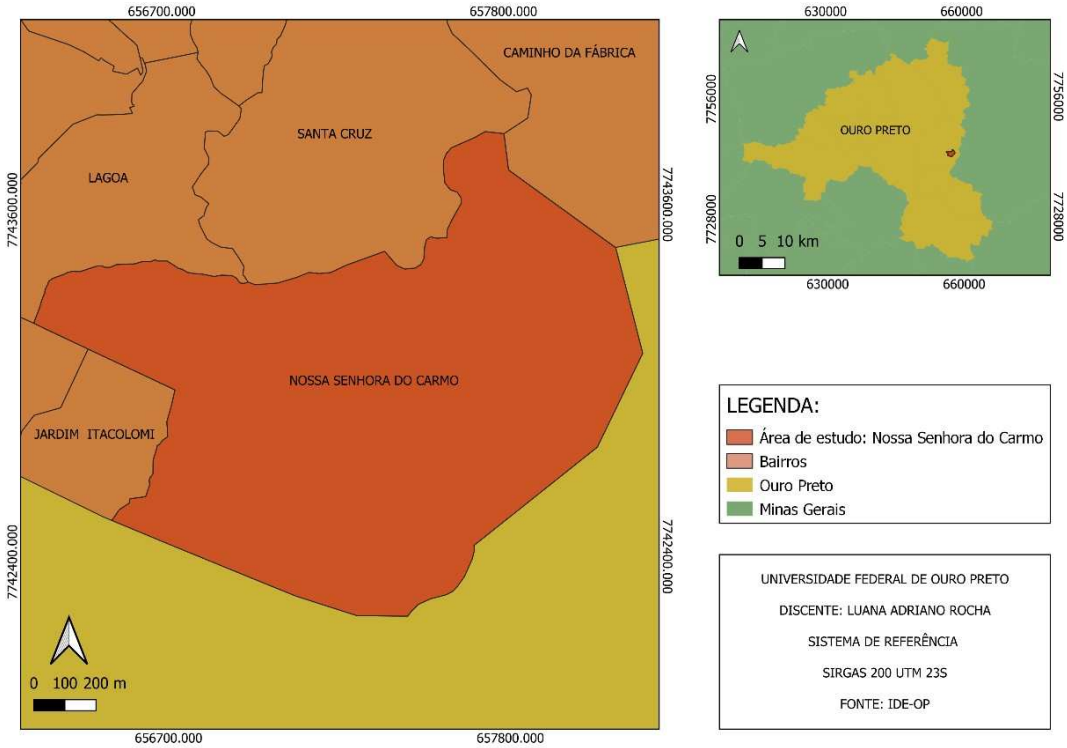
A cidade de Ouro Preto, no estado de Minas Gerais, está localizada na região Sudeste do Brasil, inserida em uma zona mínero-metalúrgica. De acordo com Oliveira e Sobreira (2015), o primeiro grande salto de crescimento urbano ocorreu nas primeiras décadas do século XVIII, quando a descoberta de ouro transformou a cidade colonial no segundo maior centro populacional da América Latina. O segundo salto aconteceu a partir da década de 1950, com o início das atividades de mineração de alumínio, ferro e outros minérios. Esse crescimento e a criação de novas áreas de moradia não foram acompanhados por planejamento urbano adequado, resultando na expansão desordenada da malha urbana e na ocupação de áreas de risco, como encostas e morros (Oliveira; Sobreira, 2015).

Reconhecida como Patrimônio Cultural da Humanidade, Ouro Preto enfrenta desafios decorrentes de sua geografia montanhosa no Quadrilátero Ferrífero, caracterizada por vales encaixados, encostas íngremes e rochas bastante alteradas. Essa configuração física, somada à distribuição irregular dos recursos hídricos, acentua as desigualdades sociais e dificulta o acesso da população a serviços básicos, como o abastecimento de água e o saneamento (Carneiro, 2025). Muitas áreas do município carecem de infraestrutura adequada e permanecem à margem do reconhecimento oficial por parte do poder público, o que compromete a implementação de políticas de habitação de interesse social (IBGE, 2021).

Com 74.821 habitantes (IBGE, 2022), Ouro Preto possui 84,8% da população atendida por rede pública de distribuição de água, enquanto 15,2% (cerca de 11.582,096 pessoas) vivem sem acesso à água encanada em seus domicílios (SINISA, 2023) e dependem do uso de fontes alternativas ou ligações clandestinas. Essa carência torna a população vulnerável a riscos à saúde devido ao uso de água sem tratamento adequado e evidencia a urgência de soluções que assegurem o abastecimento regular e seguro. Tal cenário reforça a importância de sistemas simplificados e adaptados ao contexto local, capazes de garantir o direito à água potável.

A área de estudo, conhecida popularmente como Pocinho, localiza-se na porção sudoeste da sede urbana de Ouro Preto e configura-se como um assentamento informal consolidado, formado a partir da década de 1980. Sua ocupação ocorreu de maneira espontânea, por meio de práticas de autoconstrução realizadas por moradores em situação de exclusão habitacional, sem assistência técnica ou suporte de políticas públicas estruturadas (Gonçalves, 2022). As construções utilizaram materiais acessíveis e adaptados às condições locais, refletindo a precariedade das soluções habitacionais disponíveis para a população de baixa renda naquele período.

Figura 4-1 – Mapa de localização da área de estudo bairro Nossa Senhora do Carmo.



Fonte: Autora, 2025.

A formalização do bairro ocorreu apenas anos depois, com a publicação da Lei Municipal nº 02, de 07 de junho de 1998, que oficializou sua denominação como Bairro Nossa Senhora do Carmo (Ouro Preto, 1998). Atualmente, a área apresenta condições urbanísticas limitadas, como topografia acidentada, vias não pavimentadas, ausência de drenagem e baixa acessibilidade. Esses fatores comprometem não apenas a qualidade de vida dos moradores, mas também a

circulação de serviços públicos e a efetivação de infraestrutura urbana adequada (Gonçalves, 2022).

No bairro Nossa Senhora do Carmo, foco deste estudo, essa precariedade se manifesta de forma particular. Embora o abastecimento formal seja realizado pelo consórcio Saneouro, através da ETA Itacolomi, a infraestrutura local é deficitária. Muitos domicílios enfrentam um fornecimento descontínuo, com baixa pressão e interrupções frequentes. Essa irregularidade força os moradores, mesmo aqueles formalmente conectados à rede, a manterem e utilizarem sistemas alternativos de captação e armazenamento, como poços e nascentes. Portanto, o problema a ser investigado não se restringe à falta de acesso, mas à instabilidade hídrica gerada por um serviço público ineficiente, que torna as soluções individuais uma necessidade para garantir o tratamento diário de água que fazem usos de fontes alternativas.

Após a caracterização do contexto local, a Figura 4-2 apresenta a localização da área de estudo, destacando a posição da nascente utilizada como fonte alternativa de abastecimento e do domicílio escolhido para a implantação do sistema proposto.

Figura 4-2 – Imagem de satélite com a localização da nascente utilizada e a residência do estudo (registro em julho de 2026).



Fonte: Google Earth, 2026.

4.2 Caracterização da qualidade de água

A caracterização da qualidade da água da nascente foi realizada por meio de duas campanhas amostrais. A primeira campanha compreendeu sete coletas, realizadas entre maio de 2025 e junho de 2026, com o objetivo de representar as condições usuais de qualidade da água do manancial. A segunda campanha foi realizada em 4 de fevereiro de 2026, após a ocorrência de um evento pluviométrico, com coletas sucessivas ao longo de oito horas, visando avaliar as alterações na qualidade da água no período pós-chuva e subsidiar o dimensionamento do sistema de tratamento considerando uma condição operacional mais crítica. As campanhas foram desenvolvidas no âmbito do projeto Saneamento Sustentável – UFOP, sendo a autora responsável pela realização das coletas de água. Os procedimentos de coleta, preservação e análise das amostras seguiram as recomendações do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), e os resultados obtidos foram comparados aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Todas as amostras foram identificadas e transportadas ao Laboratório de Saneamento Básico (DECIV) e de Geoprocessamento (NUGEO/DEURB) da Escola de Minas/UFOP. A avaliação foi feita a partir de análises laboratoriais dos parâmetros físico-químicos de pH, temperatura, cor aparente, turbidez e condutividade elétrica, além dos parâmetros microbiológicos coliformes totais e *Escherichia coli*.

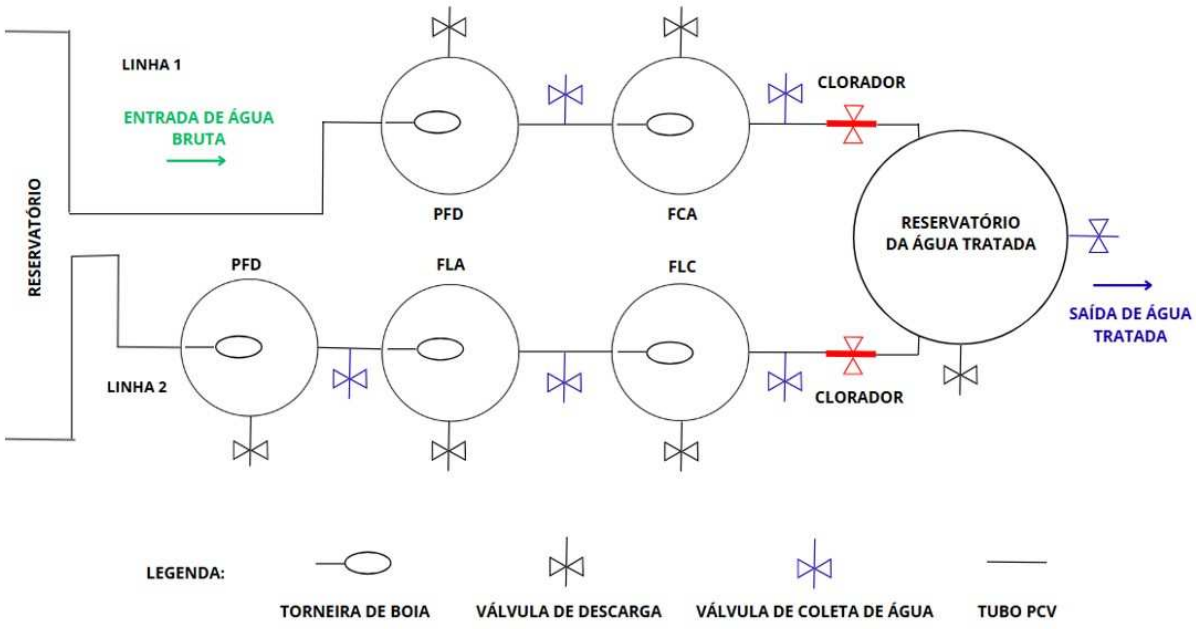
A caracterização microbiológica da água da nascente foi realizada por meio de um método quantitativo baseado no Número Mais Provável (NMP). O ensaio utiliza substratos cromogênico e fluorogênico que permitem detectar simultaneamente coliformes totais e *Escherichia coli*. Os coliformes totais são identificados pela alteração de coloração decorrente da metabolização do substrato CPRG, enquanto a presença de *E. coli* é confirmada pela fluorescência produzida pela metabolização do substrato MUG sob luz ultravioleta. Após o período de incubação, o número de poços positivos é utilizado para estimar a concentração de microrganismos, expressa em NMP/100 mL (SEIDL, 2023). A Figura 4-5 apresenta o resultado da leitura da microplaca utilizada.

4.3 Configuração do sistema proposto

O sistema de tratamento foi projetado para atender uma residência com quatro moradores, sendo constituído por duas linhas de tratamento operando em paralelo, alimentadas por um reservatório comum de água da nascente e direcionadas para um reservatório de água tratada. As linhas apresentam configurações e condições operacionais distintas, sendo uma delas composta por unidades de filtração em meio granular e a outra incorporando a filtração lenta como uma das etapas de tratamento. Essa configuração permite avaliar duas alternativas de tratamento submetidas à mesma água de entrada.

A Figura 4-3 apresenta o esquema geral do sistema, incluindo o sentido do escoamento, a sequência das unidades, os reservatórios, os pontos de entrada e saída, os cloradores e os dispositivos de controle. O detalhamento dos meios filtrantes, com as respectivas granulometrias, espessuras e quantidades de materiais, é apresentado nos resultados do dimensionamento.

Figura 4-3 – Configuração geral do sistema simplificado de tratamento de água.



Descrição: PFD corresponde ao pré-filtro dinâmico; o FDC, ao filtro de dupla camada constituído por areia e carvão antracito; o FLA, ao filtro lento de areia; e o FCA, ao filtro de carvão antracito.

Fonte: Autora, 2026.

A Linha 1 foi dimensionada com taxa de filtração de 50 m/d e é composta por um pré-filtro dinâmico e um filtro de dupla camada, ambos pressurizados e com fluxo ascendente. O pré-filtro foi incluído para favorecer a retenção inicial das partículas de maior dimensão e reduzir a carga de sólidos encaminhada à unidade seguinte. O filtro de dupla camada, constituído por areia e carvão antracito, foi adotado para promover a retenção de partículas ao longo da profundidade do leito, aproveitando as diferenças granulométricas entre os materiais.

A Linha 2 foi projetada para operar com taxa de filtração de 9,6 m/d e é constituída por um pré-filtro dinâmico, um filtro lento de areia e um filtro de carvão antracito, todos com fluxo ascendente. O pré-filtro possui a função de reduzir previamente a concentração de partículas presentes na água, contribuindo para a proteção das unidades subsequentes. O filtro lento de areia foi incluído para favorecer a retenção de partículas e a redução de microrganismos, enquanto o filtro de carvão antracito atua como etapa complementar de filtração.

Após a filtração, as duas linhas possuem uma etapa de desinfecção por cloração com pastilhas. A cloração foi mantida também na Linha 2, mesmo com a previsão de redução microbiológica no filtro lento, uma vez que a água produzida será destinada ao consumo doméstico. Dessa forma, a desinfecção atua como uma barreira complementar para o controle microbiológico da água tratada.

Foram previstos dispositivos para o controle e a manutenção do sistema. As torneiras de boia regulam a entrada de água nas unidades, enquanto as válvulas de coleta instaladas entre os filtros permitem controlar a passagem da água ao longo de cada linha. Na parte inferior das colunas, foram posicionadas válvulas de descarga destinadas ao esvaziamento e à limpeza das unidades. Após a filtração e a cloração, a água é encaminhada ao reservatório comum de água tratada, de onde segue para os usos previstos.

4.4 Dimensionamento do sistema

O levantamento da demanda hídrica da residência foi realizado a partir de conversas com os moradores durante as visitas de campo e as campanhas de coleta de água. Nessas ocasiões, os moradores relataram aspectos de sua rotina doméstica, os principais usos da água e sua relação com a nascente utilizada para o

abastecimento. A partir dessas informações, foram identificados os diferentes usos da água no domicílio, incluindo higiene pessoal, preparo de alimentos, limpeza de utensílios domésticos, lavagem de roupas, irrigação da horta e cuidado de animais.

O dimensionamento foi realizado considerando o consumo doméstico dos quatro moradores e a demanda de irrigação de uma horta de 5 m². Para este estudo, adotou-se que toda a água destinada à irrigação também passa pelo sistema de tratamento. Para a estimativa da demanda doméstica, foi considerado o consumo per capita de 100 L/hab.dia, compatível com volumes associados a condições elevadas de acesso à água para usos domésticos.

O volume da demanda doméstica, a Equação 1 representa o cálculo em questão:

$$V_{\text{doméstico}} = N \cdot q_{\text{pc}} \qquad \text{Equação 1}$$

Em que:

$V_{\text{doméstico}}$ = demanda doméstica diária, em L/dia;

N = número de moradores da residência;

q_{pc} = consumo per capita diário, em L/hab.dia.

A demanda destinada à irrigação foi calculada considerando a área da horta, a lâmina diária de irrigação e a eficiência do sistema. A Equação 2 representa o cálculo em questão:

$$V_{\text{horta}} = \frac{A_{\text{horta}} \cdot L_{\text{irrigação}}}{\eta} \qquad \text{Equação 2}$$

Em que:

V_{horta}= demanda efetiva de água para irrigação, em L/dia;

$V_{\text{horta,líq}}$= demanda líquida de irrigação, em L/dia;

η= eficiência do sistema de irrigação, expressa em valor decimal.

A demanda total de projeto foi obtida pela soma dos dois volumes. A Equação 3 representa o cálculo em questão:

$$V_{\text{projeto}} = V_{\text{doméstico}} + V_{\text{horta}}$$ Equação 3

Em que:

V_{projeto}= demanda total diária de projeto, em L/dia;

$V_{\text{doméstico}}$= demanda doméstica diária, em L/dia;

V_{horta}= demanda efetiva diária da horta, em L/dia.

As unidades filtrantes foram projetadas com tubos de PVC DN 100. O diâmetro interno foi determinado. A Equação 4 representa o cálculo em questão:

$$D_i = D_e - 2e$$ Equação 4

Em que:

D_i= diâmetro interno do tubo, em mm;

D_e= diâmetro externo do tubo, em mm;

e= espessura da parede do tubo, em mm.

Para a seção transversal circular, a área filtrante foi calculada por. A Equação 5 representa o cálculo em questão:

$$A_f = \frac{\pi D_i^2}{4}$$ Equação 5

Em que:

A_f= área transversal interna ou área filtrante da coluna, em m²;

D_i= diâmetro interno da coluna, em m;

π= constante matemática, aproximadamente igual a 3,1416.

A produção nominal de cada linha foi obtida pela relação entre a área da coluna e a taxa de filtração adotada. A Equação 6 representa o cálculo em questão:

$$Q_i = TF_i \cdot A_f$$ Equação 6

Em que:

Q_i= produção nominal da linha i, em m³/dia;

TF_i= taxa de filtração adotada para a linha i, em m/dia;

A_f= área filtrante da coluna, em m²;

i= identificação da linha de tratamento considerada.

Como as duas linhas operam em paralelo, a produção total do sistema corresponde à soma das produções individuais. A Equação 7 representa o cálculo em questão:

$$Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2 \qquad \text{Equação 7}$$

Em que:

Q_{total}= produção nominal conjunta do sistema, em L/dia;

Q_1= produção nominal da Linha 1, em L/dia;

Q_2= produção nominal da Linha 2, em L/dia.

A margem operacional foi calculada em relação à demanda de projeto. A Equação 8 representa o cálculo em questão:

$$M_{\text{op}} = \frac{Q_{\text{total}} - V_{\text{projeto}}}{V_{\text{projeto}}} \cdot 100 \qquad \text{Equação 8}$$

Em que:

M_{op}= margem operacional do sistema, em porcentagem;

V_{margem}= volume diário excedente, em L/dia;

V_{projeto}= demanda total diária de projeto, em L/dia;

100= fator de conversão para porcentagem.

Para verificar o atendimento pelo tubo adotado, a área filtrante mínima necessária para a Linha 2 foi determinada pela Equação 9 representa o cálculo em questão:

$$A_{mín} = \frac{Q_{2,nec}}{TF_2}$$ Equação 9

Em que:

$A_{mín}$= área filtrante mínima necessária para a Linha 2, em m²;

$Q_{2,nec}$= produção mínima necessária da Linha 2, em m³/dia;

TF_2= taxa de filtração adotada para a Linha 2, em m/dia.

O diâmetro interno mínimo correspondente foi calculado por. A Equação 10 representa o cálculo em questão:

$$D_{mín} = \sqrt{\frac{4\,A_{mín}}{\pi}}$$ Equação 10

Em que:

$D_{mín}$= diâmetro interno mínimo necessário, em m;

$A_{mín}$= área filtrante mínima necessária, em m²;

π= constante matemática, aproximadamente igual a 3,1416.

A profundidade de cada leito filtrante foi obtida pela soma das espessuras das camadas. A Equação 11 representa o cálculo em questão:

$$H_u = \sum_{i=1}^{n} h_i$$ Equação 11

Em que:

H_u= profundidade total dos materiais na unidade filtrante, em cm;

h_i= espessura da camada i, em cm;

n= número de camadas existentes na unidade;

i= identificação da camada considerada.

O volume de cada camada foi determinado pela área interna da coluna e pela respectiva espessura. A Equação 12 representa o cálculo em questão:

$$V_i = A_f \cdot \frac{h_i}{100} \cdot 1000 \qquad \text{Equação 12}$$

Em que:

V_i= volume calculado da camada i, em L;

A_f= área transversal interna da coluna, igual a 0,007543 m²;

h_i= espessura da camada i, em cm;

100= fator de conversão de centímetros para metros;

1000= fator de conversão de metros cúbicos para litros.

Foi acrescentada uma margem de 10% para compensar perdas durante o transporte, a lavagem e a colocação dos materiais. A Equação 13 representa o cálculo em questão:

$$V_{i,\text{compra}} = 1,10\, V_i \qquad \text{Equação 13}$$

Por fim, a massa estimada de cada material foi calculada por. A Equação 14 representa o cálculo em questão:

$$m_i = \frac{V_{i,\text{compra}}}{1000} \cdot \rho_i \qquad \text{Equação 14}$$

Em que:

m_i= massa estimada da camada i, em kg;

$V_{i,\text{compra}}$= volume de aquisição, em L;

$\rho_{i,\text{med}}$= massa específica aparente média, em kg/m³;

1000= fator de conversão de litros para metros cúbicos.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização da qualidade da água

Os resultados obtidos nas campanhas de caracterização e de monitoramento pós-chuva estão apresentados nas Figuras 5-1 e 5-2, respectivamente.

Figura 5-1 - Caracterização da qualidade da água da nascente durante o período de monitoramento (maio de 2025 a junho de 2026).

SANEAMENTO SUSTENTÁVEL - UFOP

Relatório de controle da qualidade da água - Campanha Caracterização

Ponto de monitoramento: Nascente
Local: Nossa Senhora do Carmo (Pocinho) - Ouro Preto/MG

Data	pH	Cor (PCU)	Turbidez (uT)	Temp. (°C)	Cond. (µS/cm)	Coliformes	E. coli
15/05/2025	8.49	3.20	1.61	15.40	18.20	Presença	Presença
17/06/2025	8.55	2.63	0.55	14.90	19.00	Presença	Presença
18/07/2025	8.51	2.49	2.48	14.60	17.90	Presença	Presença
20/08/2025	8.47	2.61	0.52	15.10	18.00	Presença	Presença
15/09/2025	8.50	2.70	0.59	15.80	18.10	Presença	Presença
12/02/2026	6.79	10.50	7.00	19.00	10.80	Presença	Presença
22/06/2026	8.53	2.67	0.53	16.00	18.00	Presença	Presença
Padrões	**6 a 9**	**até 15**	**até 5**	**Não possui VMP**	**Não possui VMP**	**Ausência**	**Ausência**

Observações

Os parâmetros físico-químicos apresentaram baixa turbidez e baixa cor aparente, compatíveis com uma nascente durante o período seco. O pH permaneceu dentro da faixa recomendada. A presença de coliformes totais e E. coli indica necessidade de tratamento e desinfecção antes do consumo.

Conclusões

A água apresentou boa qualidade físico-química, porém não atende ao padrão microbiológico de potabilidade da Portaria GM/MS nº 888/2021 devido à presença de coliformes totais e E. coli.

Fonte: Autora, 2026.

Os parâmetros físico-químicos apresentaram comportamento estável durante o período monitorado. O pH permaneceu entre 6,79 e 8,55, dentro da faixa estabelecida pela Portaria GM/MS nº 888/2021, enquanto a cor aparente variou entre 2,49 e 10,50 uH, permanecendo abaixo do limite de 15 uH. A turbidez apresentou valores inferiores a 5,0 uT na maior parte das campanhas, com exceção da coleta realizada em fevereiro de 2026, na qual foi registrado 7,00 uT. A condutividade elétrica manteve-se baixa durante todo o monitoramento, variando entre 10,8 e 19,0 µS/cm, indicando reduzida concentração de sólidos dissolvidos na água da nascente.

Em todas as campanhas foi constatada a presença de coliformes totais e *Escherichia coli*, indicando contaminação microbiológica da água bruta. Durante as

visitas de campo, observou-se a livre circulação de animais nas proximidades da nascente, condição que pode favorecer a contaminação de material fecal ao manancial.

Figura 5-2 - Caracterização da qualidade da água da nascente após evento pluviométrico (monitoramento de 8 horas).

SANEAMENTO SUSTENTÁVEL - UFOP

Relatório de controle da qualidade da água - Campanha Pós-Chuva

Monitoramento realizado em 04/02/2026

Ponto de monitoramento: Nascente

Local: Nossa Senhora do Carmo (Pocinho) - Ouro Preto/MG

Hora	Temp. (°C)	Cond. (µS/cm)	pH	Cor (PCU)	Turbidez (uT)	Coliformes	E. coli
17h	22.6	36.1	8.25	30	26.2	Presença	Presença
18h	22.7	20.2	7.7	22.3	14.48	Presença	Presença
19h	22.9	14.7	7.42	17.3	16.18	Presença	Presença
20h	22.9	12.4	7.39	15.3	10.69	Presença	Presença
21h	23.1	12.9	7.02	11.3	7.45	Presença	Presença
22h	23.1	12.7	6.77	8.3	6.44	Presença	Presença
23h	23.1	12.1	6.62	6.3	5.8	Presença	Presença
00h	23.2	12.5	6.4	5.3	4.2	Presença	Presença
Padrões	-	-	**6 a 9**	**até 15**	**até 5**	**Ausência**	**Ausência**

Observações

- A campanha representa o comportamento da qualidade da água nas 24 horas pós a um evento de chuva.
- Observa-se redução progressiva da condutividade, da cor aparente e da turbidez ao longo do monitoramento.
- O pH apresentou tendência de redução, permanecendo próximo da faixa de interesse para águas naturais.
- Coliformes totais e E. coli foram detectados em todas as amostras.

Conclusões

A campanha mostra o impacto imediato do evento pluviométrico sobre a qualidade da água da nascente, com melhora gradual dos parâmetros físicos ao longo do período monitorado. Os resultados microbiológicos indicam a necessidade de tratamento antes do consumo.

Fonte: Autora, 2026.

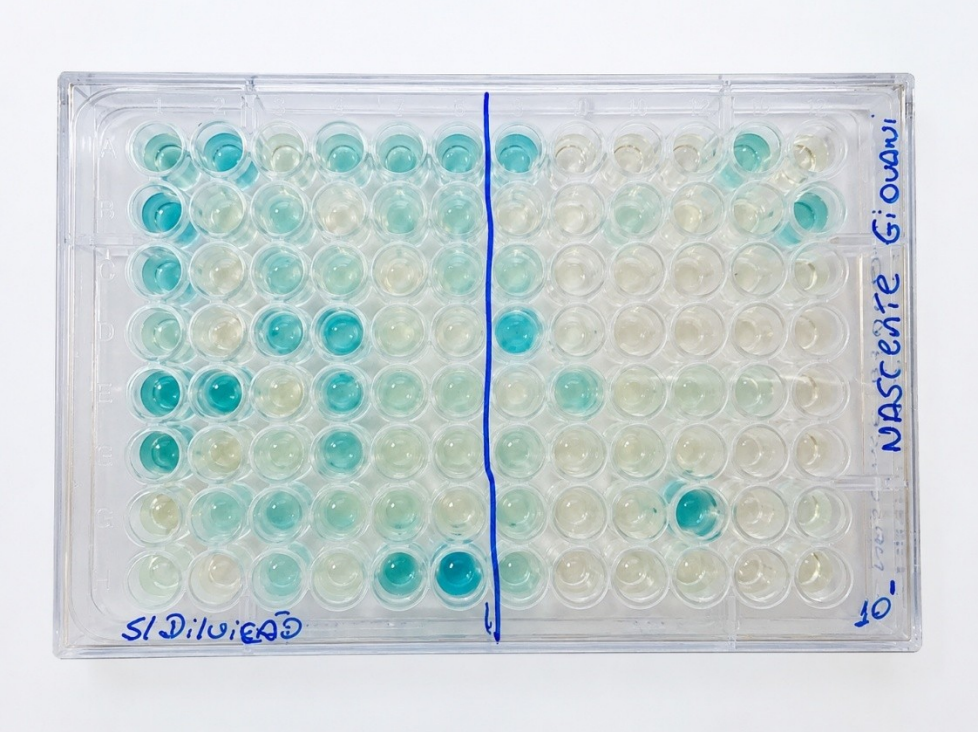
O monitoramento realizado nas 8 horas subsequentes ao evento pluviométrico evidenciou melhora gradual da qualidade físico-química da água ao longo do período avaliado. A turbidez reduziu de 26,2 uT para 4,2 uT, enquanto a cor aparente diminuiu de 30,0 para 5,3 uH, indicando a decantação progressiva das partículas em suspensão transportadas para o manancial durante a chuva. A condutividade elétrica também apresentou redução, passando de 36,1 para aproximadamente 12 µS/cm, estabilizando-se nas últimas medições. O pH variou entre 8,25 e 6,40, permanecendo dentro da faixa estabelecida pela Portaria GM/MS nº 888/2021 durante todo o monitoramento.

Em contrapartida, coliformes totais e *Escherichia coli* foram detectados em todas as amostras, indicando que a melhoria dos parâmetros físicos não foi

acompanhada da recuperação da qualidade microbiológica da água. Esse comportamento demonstra que, mesmo após a redução da turbidez e da cor para valores compatíveis com o padrão de potabilidade, a água permaneceu imprópria para consumo.

A Figura 5-3 apresenta a leitura da microplaca obtida na análise microbiológica da água da nascente. A identificação dos poços positivos permitiu determinar a ocorrência de coliformes totais e *Escherichia coli* e, posteriormente, estimar suas concentrações em NMP/100 mL.

Figura 5-3 – Resultado da leitura da microplaca para quantificação de coliformes totais e Escherichia coli na água.

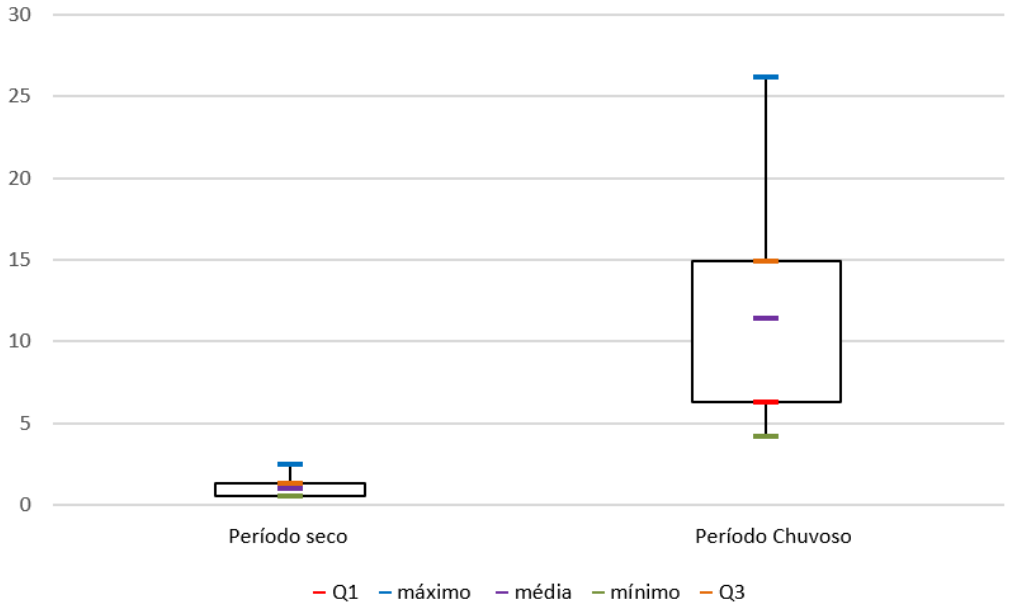


Fonte: Autora, 2026.

Foram estimados 20 NMP/100 mL de coliformes totais e 1 NMP/100 mL de Escherichia coli. A detecção de E. coli, mesmo em valor reduzido, indica contaminação fecal e caracteriza a amostra como inadequada ao consumo humano, conforme a Portaria GM/MS nº 888/2021. Esse resultado reforça a necessidade de tratamento prévio à utilização.

A qualidade da água da nascente apresentou diferenças entre os períodos seco e chuvoso, especialmente quanto à turbidez e à cor aparente. As Figuras 5-4 e 5-5 apresentam a distribuição dos resultados obtidos para esses parâmetros, incluindo os valores mínimo e máximo, o primeiro e o terceiro quartis e a média das amostras.

Figura 5-4 – Distribuição dos valores de turbidez da água da nascente nos períodos seco e chuvoso.

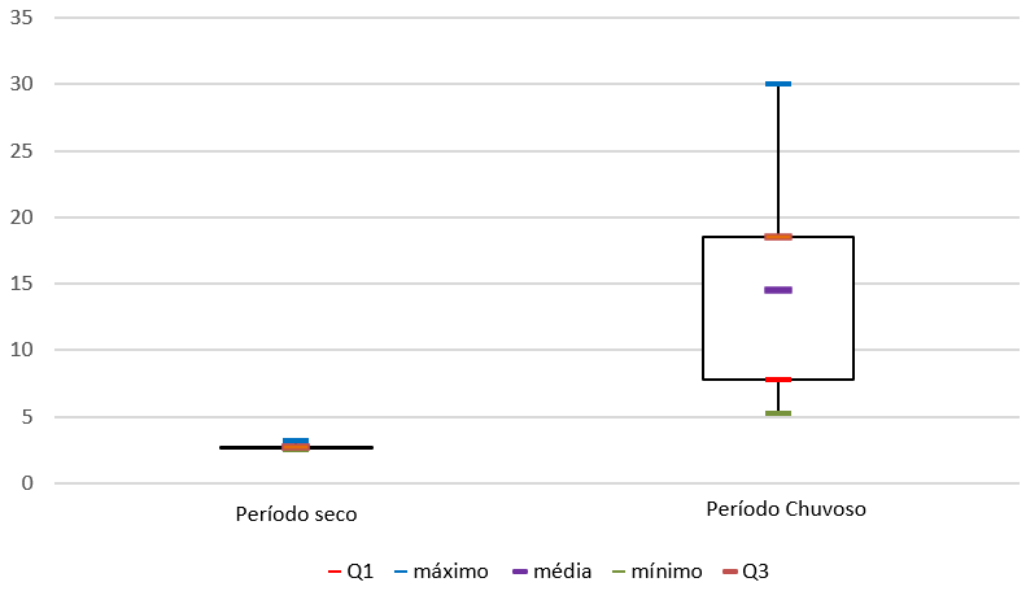


Fonte: Autora, 2026.

Durante o período seco, a turbidez permaneceu baixa e apresentou pouca variação entre as amostras, com média próxima de 1 uT e pequena amplitude entre os valores mínimo e máximo. No período chuvoso, observou-se aumento da média para aproximadamente 11 uT, acompanhado por maior dispersão dos resultados e valor máximo próximo de 26 uT.

Os intervalos interquartis dos dois períodos não apresentam sobreposição, indicando uma diferença acentuada entre as condições analisadas. Esse comportamento sugere que, durante o período chuvoso, a nascente fica mais sujeita à entrada de partículas suspensas, possivelmente associada ao aumento do escoamento superficial e ao carreamento de materiais para o manancial.

Figura 5-5 – Distribuição dos valores de cor aparente da água da nascente nos períodos seco e chuvoso.



Fonte: Autora, 2026.

No período seco, os valores de cor aparente permaneceram próximos de 3 uH, com pouca variação entre as campanhas de monitoramento. Durante o período chuvoso, a média aumentou para aproximadamente 14 uH, enquanto o valor máximo atingiu cerca de 30 uH. Também foi observada maior amplitude interquartil, evidenciando maior variabilidade dos resultados nesse período.

O aumento da cor aparente pode estar relacionado à presença de partículas em suspensão e de compostos dissolvidos ou coloidais transportados durante as chuvas. Entretanto, a amplitude observada indica que a resposta da nascente não ocorre de forma uniforme, podendo variar conforme a intensidade, a duração e as características de cada evento pluviométrico.

De maneira conjunta, os resultados mostram que os maiores valores de turbidez e cor aparente ocorreram durante o período chuvoso. Além do aumento das médias, esse período apresentou maior dispersão dos dados, indicando maior variabilidade da qualidade da água bruta. No período seco, por outro lado, os dois parâmetros permaneceram mais baixos e relativamente estáveis.

Essa variação sazonal reforçou a importância de avaliar o sistema de tratamento em diferentes condições da água de entrada, principalmente durante o período chuvoso, quando foram registrados os maiores valores e a maior variabilidade dos parâmetros. Dessa forma, será possível verificar o desempenho das linhas propostas tanto em condições mais estáveis quanto em situações de maior alteração da qualidade da água da nascente.

5.2 Parâmetros de projeto e configuração do sistema

Com base nas premissas e nos procedimentos apresentados na metodologia, foram definidas a demanda diária de projeto, a capacidade de produção das duas linhas e as dimensões necessárias para as unidades filtrantes. O dimensionamento também contemplou a verificação do diâmetro adotado, a configuração dos leitos e os quantitativos de materiais necessários à montagem do sistema. As etapas são apresentadas nos subtópicos seguintes, iniciando pela determinação da demanda e avançando para o dimensionamento hidráulico e físico das unidades propostas.

5.2.1 Demanda diária de projeto

Com base nos critérios estabelecidos na metodologia, foi determinada a demanda diária necessária para atender aos usos de água considerados na residência. Os valores correspondentes ao consumo doméstico e à irrigação da horta, bem como a demanda total de projeto, são apresentados na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Demanda diária de projeto.

Componente	Demanda (L/dia)
Consumo doméstico	400,00
Irrigação da horta	31,25
Demanda total	**431,25**

Fonte: Autora.

A demanda diária de projeto foi estimada em 431,25 L/dia, dos quais 400,00 L/dia correspondem ao consumo doméstico e 31,25 L/dia à irrigação da horta. Dessa forma, o sistema foi dimensionado para atender a uma demanda diária mínima de

431,25 L. Os cálculos foram realizados conforme os critérios e procedimentos apresentados na metodologia.

5.2.2 Área filtrante e produção das linhas

Com base na área filtrante das unidades e nas taxas de filtração adotadas para cada configuração, foi estimada a capacidade nominal de produção das duas linhas de tratamento. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Produção nominal das linhas de tratamento.

Linha	Taxa de filtração (m/dia)	Área filtrante (m²)	Produção nominal (L/dia)
Linha 1	50,0	0,007543	377,15
Linha 2	9,6	0,007543	72,41
Total			**449,56**

Fonte: Autora.

A produção nominal conjunta das duas linhas foi estimada em 449,56 L/dia, valor superior à demanda diária de projeto de 431,25 L/dia. A diferença entre a capacidade nominal do sistema e a demanda corresponde a 18,31 L/dia, equivalente a aproximadamente 4,25% da demanda de projeto. Dessa forma, considerando exclusivamente os parâmetros adotados no dimensionamento hidráulico, a capacidade nominal prevista para o sistema é suficiente para atender à demanda estabelecida para a residência.

5.2.3 Verificação da área e do diâmetro mínimos

A partir da demanda diária de projeto e da contribuição prevista para cada linha de tratamento, foram verificados os parâmetros mínimos necessários ao atendimento da capacidade de produção estabelecida. Os resultados do dimensionamento hidráulico são apresentados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 – Resultado do dimensionamento hidráulico.

Parâmetro	Valor
Demanda diária de projeto	431,25 L/dia
Produção mínima requerida para a Linha 1	358,84 L/dia
Área filtrante mínima	0,007177 m²
Diâmetro interno mínimo	95,6 mm
Diâmetro interno adotado	98,0 mm

Fonte: Autora.

A produção mínima requerida para a Linha 1 foi estimada em 358,84 L/dia, considerando a contribuição de 72,41 L/dia da Linha 2 para o atendimento da demanda total de projeto. Para essa condição, obteve-se área filtrante mínima de 0,007177 m², correspondente a um diâmetro interno mínimo de 95,6 mm. Como o tubo DN 100 adotado apresenta diâmetro interno de 98,0 mm, superior ao valor mínimo calculado, verifica-se que a seção adotada atende ao dimensionamento hidráulico proposto. Além disso, a produção nominal estimada para a Linha 1, de 377,15 L/dia, é superior à produção mínima requerida de 358,84 L/dia, confirmando o atendimento à demanda de projeto pela configuração dimensionada.

5.2.4 Profundidade dos leitos filtrantes

A Tabela 5-2 apresenta as profundidades dos leitos filtrantes, obtidas pela soma das espessuras das camadas de cada unidade. Esses valores correspondem exclusivamente aos materiais filtrantes, não incluindo a lâmina d'água, a borda livre nem os dispositivos internos das colunas.

Tabela 5-4 – Profundidade dos leitos filtrantes.

Linha	Unidade	Espessuras das camadas (cm)	Profundidade total (cm)
Linha 1	Pré-filtro dinâmico	(15+30+25+25)	95,0
Linha 1	Filtro de dupla camada	(10+7,5+7,5+25+45)	95,0
Linha 2	Pré-filtro dinâmico	(15+30+25+25)	95,0

Linha	Unidade	Espessuras das camadas (cm)	Profundidade total (cm)
Linha 2	Filtro lento de areia	(7,5+5+5+50)	67,5
Linha 2	Filtro de carvão antracitoso	(7,5+3+3+1,5+40)	55,0

Fonte: Autora, 2026.

Observa-se que os maiores leitos individuais correspondem ao pré-filtro dinâmico e ao filtro de dupla camada da Linha 1, ambos com 95,0 cm de profundidade. Na Linha 2, o pré-filtro mantém a profundidade, enquanto o filtro lento de areia e o filtro de carvão antracito apresentam leitos de 67,5 cm e 55,0 cm, respectivamente. Considerando o conjunto das unidades de cada linha, a Linha 1 apresenta 190,0 cm de leitos filtrantes, enquanto a Linha 2 totaliza 217,5 cm. Dessa forma, embora a Linha 2 apresente menores profundidades individuais nas unidades posteriores ao pré-filtro, sua configuração com três unidades resulta em maior profundidade filtrante acumulada, refletindo a adoção de etapas sucessivas de filtração ao longo do tratamento.

5.2.5 Quantidade de materiais filtrantes

Os quantitativos de materiais filtrantes foram determinados a partir da área filtrante dimensionada e das espessuras adotadas para cada camada, conforme o procedimento de cálculo descrito na metodologia. Para fins de aquisição dos materiais, foi considerada uma margem adicional de 10% sobre os volumes calculados. A Tabela 5-5 apresenta os volumes e as massas estimadas dos materiais necessários para a implantação das duas linhas de tratamento.

Tabela 5-5 – Quantitativos dos materiais filtrantes.

Unidade	Material	Espessura por unidade (cm)	Número de unidades	Volume com 10% (L)	Massa estimada (kg)
Pré-filtro	Suporte de	15,0	2	2,49	4,11

Unidade	Material	Espessura por unidade (cm)	Número de unidades	Volume com 10% (L)	Massa estimada (kg)
dinâmico	pedregulho grosso				
Pré-filtro dinâmico	Pedregulho grosso	30,0	2	4,98	8,21
Pré-filtro dinâmico	Pedregulho intermediário	25,0	2	4,15	6,85
Pré-filtro dinâmico	Pedregulho fino	25,0	2	4,15	6,85
Filtro lento	Pedregulho grosso	7,5	1	0,62	1,03
Filtro lento	Pedregulho fino	5,0	1	0,41	0,68
Filtro lento	Areia grossa	5,0	1	0,41	0,67
Filtro lento	Areia fina	50,0	1	4,15	6,68
Filtro de carvão	Suporte de 9,5 a 19 mm	7,5	1	0,62	1,03
Filtro de carvão	Suporte de 4,8 a 9,5 mm	3,0	1	0,25	0,41
Filtro de carvão	Suporte de 2,0 a 4,8 mm	3,0	1	0,25	0,41
Filtro de carvão	Suporte de 1,2 a 2,0 mm	1,5	1	0,12	0,21
Filtro de carvão	Carvão antracitoso	40,0	1	3,32	2,90
Filtro de dupla	Suporte de 6,65 a	10,0	1	0,83	1,37

Unidade	Material	Espessura por unidade (cm)	Número de unidades	Volume com 10% (L)	Massa estimada (kg)
camada	12,7 mm				
Filtro de dupla camada	Suporte de 3,18 a 6,65 mm	7,5	1	0,62	1,03
Filtro de dupla camada	Suporte de 2,0 a 3,18 mm	7,5	1	0,62	1,03
Filtro de dupla camada	Areia	25,0	1	2,07	3,34
Filtro de dupla camada	Carvão antracitoso	45,0	1	3,73	3,27
	Total:			33,81	50,06

Fonte: Autora, 2026.

Para a implantação das duas linhas, estima-se a necessidade total de aproximadamente 33,81 L de materiais filtrantes, já considerando a margem adicional de 10%, equivalente a uma massa aproximada de 50,06 kg.

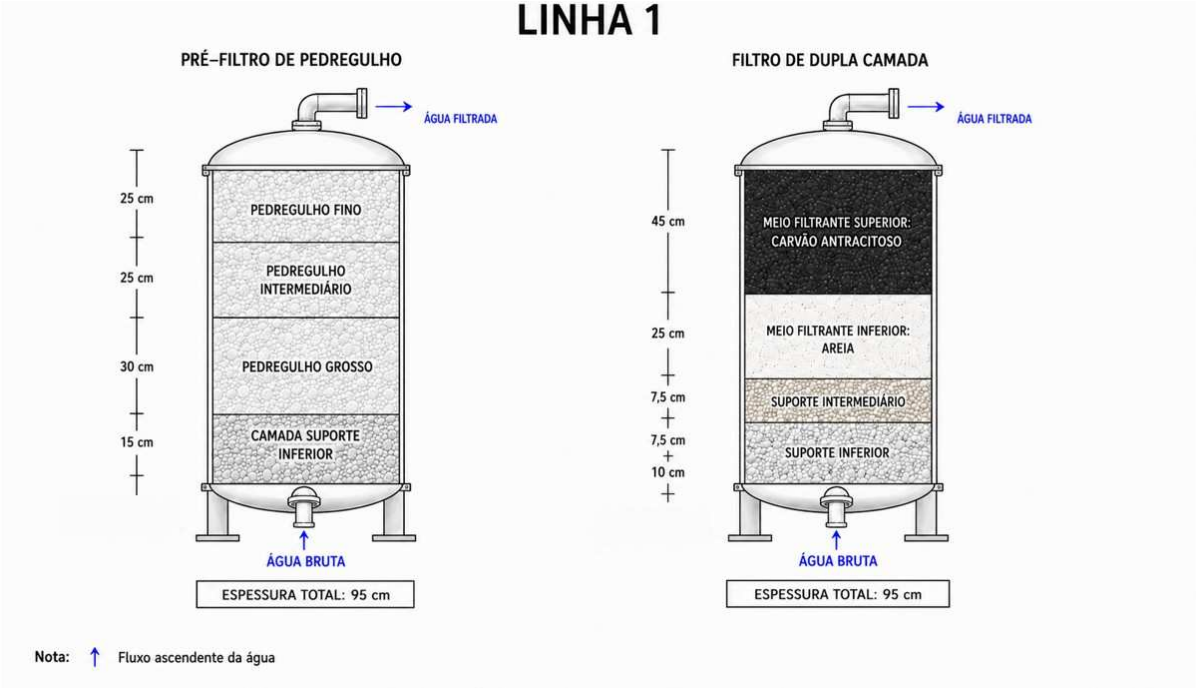
Na versão final, as taxas de filtração, as espessuras dos leitos e as massas específicas aparentes adotadas deverão ser acompanhadas das respectivas referências técnicas.

5.3 Configuração das unidades de tratamento

As espessuras e a disposição dos materiais nas unidades de tratamento foram definidas com base em sistemas descritos na literatura e em experiências anteriores com tratamento simplificado, com adaptações às dimensões das colunas, ao fluxo ascendente e à escala do sistema proposto.

A Linha 1 é composta por um pré-filtro de pedregulho e um filtro de dupla camada pressurizado, ambos com fluxo ascendente. A disposição dos materiais e as respectivas espessuras dos leitos filtrantes dessas unidades são apresentadas na Figura 5-6.

Figura 5-6 – Configuração das unidades de tratamento da Linha 1.



Fonte: Autora, 2026.

O pré-filtro de pedregulho apresenta quatro camadas, totalizando 95 cm de material granular. Da base para o topo, foram adotados 15 cm de camada suporte inferior, 30 cm de pedregulho grosso, 25 cm de pedregulho intermediário e 25 cm de pedregulho fino. Essa composição foi reproduzida do sistema simplificado implantado no Acampamento Novo Taquaral, em Ouro Preto, apresentado por Vieira (2024). A manutenção granulométrica busca promover a retenção progressiva das partículas presentes na água bruta e reduzir a carga de sólidos encaminhada ao filtro subsequente. O sistema utilizado como referência também foi estruturado com pré-filtração em pedregulho, seguida de filtração e desinfecção.

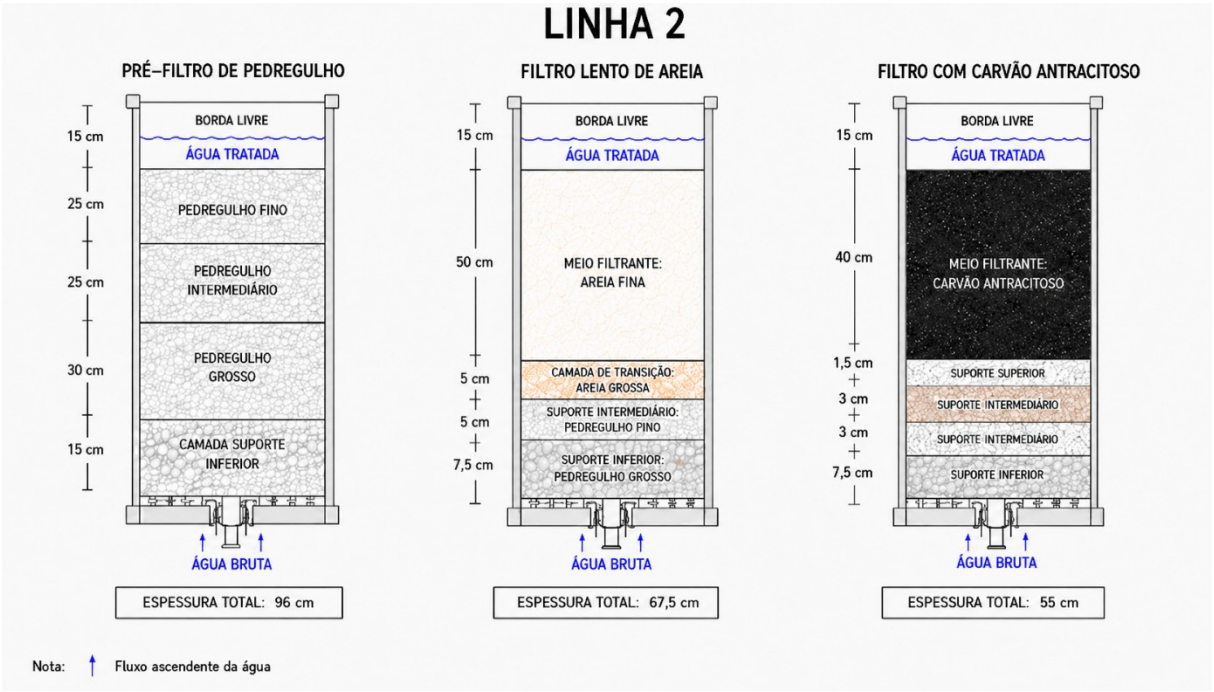
O filtro de dupla camada possui espessura total de 95 cm, sendo constituído por 25 cm de camada suporte, 25 cm de areia e 45 cm de carvão antracito. A camada suporte foi dividida em três faixas granulométricas, com 10 cm de suporte inferior, 7,5

cm de suporte intermediário e 7,5 cm de suporte superior. A disposição da areia abaixo do carvão antracito e a configuração do suporte foram definidas com base em Koerig (2022). As espessuras dos meios filtrantes foram ampliadas em relação à escala experimental apresentada pela autora, considerando também as camadas empregadas no sistema implantado por Vieira (2024).

A maior granulometria e a menor massa específica do carvão antracito justificam sua posição sobre a camada de areia. Essa disposição permite que as partículas sejam retidas em diferentes profundidades do leito, enquanto as camadas inferiores sustentam os meios filtrantes e contribuem para a distribuição do fluxo ascendente.

A Linha 2 é composta por um pré-filtro de pedregulho, um filtro lento de areia e um filtro com carvão antracito, todos com fluxo ascendente. A configuração das três unidades é apresentada na Figura 5-7.

Figura 5-7 – Configuração das unidades de tratamento da Linha 2.



Fonte: Autora, 2026.

O pré-filtro da Linha 2 apresenta a mesma configuração adotada na Linha 1, com 95 cm de material granular. A utilização de unidades semelhantes nas duas linhas permite que ambas recebam uma etapa inicial equivalente de retenção de partículas, mantendo a principal diferença entre as configurações nas etapas posteriores.

O filtro lento de areia apresenta 67,5 cm de materiais, distribuídos em 7,5 cm de suporte inferior de pedregulho grosso, 5 cm de suporte intermediário de pedregulho fino, 5 cm de areia grossa e 50 cm de areia fina. A configuração foi definida com base no filtro domiciliar apresentado por Maciel (2018), desenvolvido a partir das orientações da CAWST (2012).

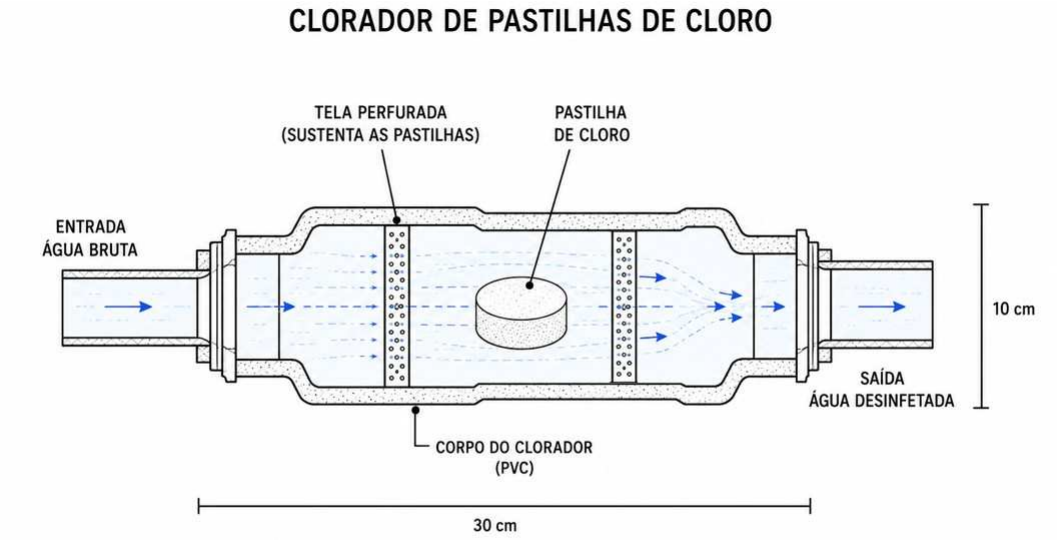
A camada de areia fina constitui o principal meio filtrante da unidade, enquanto as camadas inferiores promovem sua sustentação e reduzem a possibilidade de deslocamento dos grãos para o sistema de entrada. A espessura de 50 cm representa uma configuração compacta, adaptada à escala domiciliar do sistema proposto, diferindo das maiores profundidades normalmente empregadas em unidades convencionais.

O filtro com carvão antracito apresenta 55 cm de materiais, sendo 40 cm de meio filtrante e 15 cm de camadas suporte. O suporte foi dividido em quatro faixas, com espessuras de 7,5 cm, 3 cm, 3 cm e 1,5 cm, organizadas da maior para a menor granulometria no sentido ascendente.

A espessura do meio filtrante foi adotada com base em Poncio (2023), que utilizou uma camada de 40 cm de carvão antracito. No presente projeto, a profundidade total do suporte foi ampliada para 15 cm, mantendo-se a distribuição granulométrica apresentada pelo autor. Essa adaptação busca melhorar a sustentação do carvão e favorecer a distribuição da água na entrada do leito.

Após a filtração, a água produzida nas duas linhas é encaminhada para unidades de desinfecção com pastilhas de cloro. O dispositivo proposto é apresentado na Figura 5-8.

Figura 5-8 – Configuração do clorador de pastilhas.



Fonte: Autora, 2026.

O clorador foi definido a partir do dispositivo desenvolvido no âmbito do projeto de sistema simplificado de tratamento de água coordenado pelo professor Paulo Vieira, na Universidade Federal de Ouro Preto. A experiência utilizada como referência empregou filtração em múltiplas etapas seguida de cloração com pastilhas e incluiu o desenvolvimento de um clorador simplificado para aplicação do agente desinfetante.

A unidade proposta possui corpo em PVC, com aproximadamente 30 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro. A pastilha é posicionada no interior do dispositivo, entre duas telas perfuradas que permitem a passagem da água e impedem seu deslocamento para a tubulação. A água filtrada entra por uma das extremidades, entra em contato com a pastilha e sai do clorador em direção ao reservatório de água tratada.

A adoção do clorador nas duas linhas foi mantida como etapa complementar de segurança microbiológica. Na Linha 2, a desinfecção complementa a redução de microrganismos esperada durante a filtração lenta. Na Linha 1, permite avaliar a qualidade da água após uma configuração com maior taxa de filtração e, posteriormente, após a aplicação do desinfetante.

As configurações apresentadas representam as dimensões dos meios filtrantes e das camadas suporte. Na Linha 2, também foi prevista borda livre de 15 cm sobre os leitos. As alturas construtivas das colunas devem considerar, além das espessuras

indicadas, o espaço destinado à água, os dispositivos de entrada e saída e as conexões necessárias à operação.

6 CONCLUSÃO

O acesso à água potável permanece como um dos principais desafios para a universalização do saneamento básico, especialmente em localidades não atendidas pelos sistemas convencionais de abastecimento. Nesse contexto, as soluções alternativas individuais assumem papel relevante ao possibilitar o atendimento de populações para as quais a implantação da rede pública se mostra limitada sob os aspectos técnicos ou territoriais.

O presente trabalho teve como objetivo propor e dimensionar duas alternativas simplificadas de tratamento de água para aplicação em uma solução alternativa individual de abastecimento localizada no município de Ouro Preto, MG, bem como compará-las quanto ao dimensionamento hidráulico e às condições operacionais previstas em projeto. A partir da caracterização da demanda hídrica da residência estudada e da avaliação da qualidade da água proveniente da nascente utilizada para abastecimento, foi possível identificar a necessidade da adoção de etapas de tratamento voltadas à melhoria das características físicas e microbiológicas da água destinada ao consumo humano.

Os resultados obtidos evidenciaram que a água bruta apresenta variações em seus parâmetros de qualidade ao longo do período avaliado, com alterações observadas após o evento pluviométrico monitorado, reforçando a importância de considerar essas variações na concepção e no dimensionamento do sistema de tratamento. A detecção de contaminação microbiológica, ainda que pontual, também evidenciou a necessidade da inclusão de uma etapa de desinfecção no sistema proposto, de forma compatível com os requisitos estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

O dimensionamento permitiu estabelecer duas configurações de tratamento compatíveis, sob o ponto de vista hidráulico, com a demanda da residência estudada. A adoção de configurações distintas de filtração possibilitou comparar diferentes capacidades de produção e arranjos operacionais, fornecendo subsídios para a seleção de soluções compatíveis com a demanda da residência e com as

características da água bruta avaliada. Além disso, a utilização de materiais disponíveis no mercado e a configuração das unidades em escala domiciliar contribuem para a exequibilidade construtiva das configurações propostas.

A comparação entre as duas configurações propostas, sob o ponto de vista do dimensionamento hidráulico, demonstrou diferenças em suas capacidades produtivas. A Linha 1, composta por pré-filtro de pedregulho e filtro de dupla camada, apresentou maior capacidade estimada de produção em relação à Linha 2, constituída por pré-filtro de pedregulho, filtro lento de areia e filtro de carvão antracito. Essa maior capacidade produtiva amplia o potencial da Linha 1 para o atendimento da demanda hídrica da residência avaliada, considerando as condições de projeto adotadas neste trabalho.

As diferenças entre as configurações também evidenciam que a seleção de uma alternativa de tratamento não deve considerar apenas sua capacidade de produção. A Linha 2 apresenta uma sequência de tratamento composta por maior número de unidades, incluindo a filtração lenta, enquanto a Linha 1 é composta por duas unidades e foi dimensionada para operar com taxa de filtração superior à adotada na Linha 2. Dessa forma, as alternativas apresentam concepções distintas, cuja adequação deve ser avaliada considerando não apenas os aspectos hidráulicos, mas também o desempenho efetivo de cada configuração na melhoria da qualidade da água.

Destaca-se, portanto, que a comparação desenvolvida neste trabalho contemplou o dimensionamento hidráulico e as condições operacionais previstas em projeto, não abrangendo a avaliação experimental do desempenho das unidades nem da qualidade da água tratada. Embora a capacidade de produção seja um parâmetro importante para a seleção da configuração, a definição do sistema mais adequado depende também do desempenho das unidades frente aos parâmetros de qualidade de interesse e da qualidade final da água produzida. Nesse sentido, não é possível afirmar, nesta etapa, qual das duas configurações apresenta o melhor desempenho global para o tratamento da água da nascente.

Considerando exclusivamente o dimensionamento hidráulico, a Linha 1 apresentou maior capacidade produtiva e maior potencial de atendimento à demanda da residência estudada. Entretanto, a escolha definitiva entre as duas configurações

deve ser precedida de validação experimental, mediante a implantação e a operação das duas configurações, com o monitoramento dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água tratada e a comparação dos resultados com os padrões de potabilidade aplicáveis estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

7 PROPOSTA PARA ESTUDOS POSTERIORES

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam o potencial da associação entre tecnologias simplificadas para aplicação em soluções alternativas individuais de abastecimento de água. Entretanto, a avaliação desenvolvida limitou-se ao dimensionamento e à proposição das configurações tecnológicas empregadas, tornando necessária a realização de estudos complementares destinados à validação experimental e à otimização das soluções propostas.

Nesse contexto, a implantação dos sistemas dimensionados constitui uma oportunidade para a avaliação do desempenho operacional das configurações propostas em condições reais de utilização. O monitoramento da qualidade da água produzida poderá contribuir para a verificação da eficiência dos processos empregados no tratamento, contemplando parâmetros físicos, químicos e microbiológicos associados ao atendimento dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Adicionalmente, a operação contínua das unidades permitirá avaliar aspectos relacionados à frequência das operações de manutenção, à duração das carreiras de filtração e ao comportamento do sistema frente às variações temporais da qualidade da água bruta.

Outra possibilidade de investigação refere-se à otimização das configurações propostas neste trabalho. Considerando que o filtro intermediário apresenta maior capacidade de produção quando comparado às demais configurações avaliadas, estudos complementares poderão investigar a viabilidade de sua utilização como unidade única de tratamento, mediante adequações em seu dimensionamento. Entre as possibilidades de análise, destaca-se a avaliação do aumento do diâmetro das tubulações empregadas e de seus efeitos sobre a capacidade de produção do sistema e suas condições operacionais. A implantação dessa configuração permitirá verificar se sua adoção constitui uma alternativa tecnicamente compatível com os padrões de

qualidade da água produzida e operacionalmente adequada às demandas previstas para soluções alternativas individuais de abastecimento.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília, DF: ANA, 2021. 332 p.

AMARAL, L. A.; NADER FILHO, A.; ROSSI JUNIOR, O. D.; FERREIRA, F. L. A.; BARROS, L. S. S. Água de consumo humano como fator de risco à saúde em propriedades rurais. Revista de Saúde Pública, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 510-514, 2003. DOI: https://doi.org/10.1590/S0034-89102003000400017.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Washington, DC: APHA Press, 2017.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 8 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 16 jul. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 85, p. 127, 7 maio 2021.

BRINCK, N. C. P. Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento. 2009. 415 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BRITO, L. T. L.; AMORIM, M. C. C.; LEITE, W. M. Qualidade da água para consumo humano. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007. 16 p. (Documentos, 196).

CENTRE FOR AFFORDABLE WATER AND SANITATION TECHNOLOGY (CAWST). Biosand filter construction manual. Calgary: CAWST, 2012.

CARNEIRO, J. P. Avaliação de sistema simplificado de tratamento de água. 2025. Monografia (Graduação em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2025.

DI BERNARDO, L.; BRANDÃO, C. C. S.; HELLER, L. Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas. Rio de Janeiro: ABES, 1999. (PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico).

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. Métodos e técnicas de tratamento de água. 3. ed. São Carlos: LDiBe, 2017. 1296 p.

DIAS, D. M.; MARTINEZ, C. B.; LIBÂNIO, M. Modelo para estimativa do consumo domiciliar de água e de energia elétrica em centros urbanos a partir de variáveis socioeconômicas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 7-20, out./dez. 2014. DOI: https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n4.p7-20.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d'água e propostas de especialistas. Revista Geografias, Belo Horizonte, v. 9, n. 1, p. 70-81, 2013. DOI: https://doi.org/10.35699/2237-549X.13354.

FREITAS, B. L. S. et al. A critical overview of household slow sand filters for water treatment. Water Research, v. 208, art. 117870, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117870.

FREITAS, M. B.; FREITAS, C. M. A vigilância da qualidade da água para consumo humano: desafios e perspectivas para o Sistema Único de Saúde. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 10, n. 4, p. 993-1004, 2005. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-81232005000400022.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). Manual de saneamento. 3. ed. rev. Brasília, DF: Funasa, 2006.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). Manual de orientações técnicas para elaboração e apresentação de propostas e projetos para sistemas de abastecimento de água. Brasília, DF: Funasa, 2017.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). Manual de saneamento. 4. ed. Brasília, DF: Funasa, 2019.

GONÇALVES, L. B. Desafios e potencialidades da assessoria técnica para práticas de autoconstrução: estudo de caso no Bairro Nossa Senhora do Carmo - Ouro Preto/MG. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

GUEDES, M. J. F.; RIBEIRO, M. M. R.; VIEIRA, Z. M. C. L. Alternativas de gerenciamento da demanda de água na escala de uma cidade. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 123-134, abr./jun. 2014. DOI: https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n2.p123-134.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (org.). Abastecimento de água para consumo humano. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2022: população e domicílios - primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/. Acesso em: 19 jul. 2026.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Entenda o Marco Legal. [S. l.], 2025. Disponível em: https://marcolegal.aguaesaneamento.org.br/entenda-o-marco-legal/. Acesso em: 7 ago. 2025.

KOERIG, L. L. A. Avaliação da retrolavagem em um sistema de filtração lenta utilizando areia e carvão antracitoso como material filtrante. 2022. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

LOGSDON, G. S. Water filtration practices: including slow sand filters and precoat filtration. Denver: American Water Works Association, 2011.

MACIEL, P. M. F. Filtração lenta domiciliar como alternativa de tratamento de água em comunidades isoladas: eficiências com e sem controle de nível da água e aceleração do amadurecimento. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. DOI: https://doi.org/10.11606/T.18.2019.tde-18032019-163138.

MEDEIROS, R. C. et al. Drinking water treatment by multistage filtration on a household scale: efficiency and challenges. Water Research, v. 178, art. 115816, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115816.

MOURA, M. N.; FELIPPE, M. F. Avaliação de nascentes para a gestão ambiental integrada: insuficiências e proposições apontadas por um painel de especialistas. Ateliê Geográfico, Goiânia, v. 16, n. 3, p. 215-241, 2022. DOI: https://doi.org/10.5216/ag.v16i3.72240.

MOURA, R. F. V. B. Técnicas simplificadas de tratamento de água: roteiros para utilização. 2021. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2021.

NATIONAL ENVIRONMENTAL ENGINEERING RESEARCH INSTITUTE (NEERI); IRC INTERNATIONAL WATER AND SANITATION CENTRE. Slow sand filtration: phase IV final report. Nagpur: NEERI, 1989.

OLIVEIRA, L. D.; SOBREIRA, F. G. Crescimento urbano de Ouro Preto-MG entre 1950 e 2004 e atuais tendências. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, v. 67, n. 4, p. 867-876, jul./ago. 2015.

OLIVEIRA, M. Filtros lentos domiciliares para tratamento de água da chuva para fins de consumo. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. DOI: https://doi.org/10.11606/D.18.2021.tde-06082021-184244.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Assembleia Geral. Resolução A/RES/64/292: o direito humano à água e ao saneamento. Nova York: ONU, 28 jul. 2010.

OURO PRETO (MG). Lei nº 02, de 7 de junho de 1998. Dá denominação ao Bairro Nossa Senhora do Carmo. Disponível em: https://cmop.mg.gov.br/leis/. Acesso em: 8 ago. 2025.

OURO PRETO (MG). Prefeitura Municipal. Plano Municipal de Saneamento Básico de Ouro Preto: Produto 8 - relatório final do PMSB/OP: documento síntese. Ouro Preto: Prefeitura Municipal de Ouro Preto, 2012.

PONCIO, T. O. Avaliação da eficiência de sistemas de pré-tratamento de água utilizando filtros preenchidos com diferentes materiais e características granulométricas. 2023. 153 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2023.

REZENDE, S. C.; HELLER, L. O saneamento no Brasil: políticas e interfaces. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008. 387 p.

ROMAN, M. L. M.; ROQUE, V. G. P.; ROCHA, L. A.; VIEIRA, P. C. Análise do uso e ocupação do solo de nascentes cadastradas no perímetro urbano da sede de Ouro Preto-MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26., 2025, Vitória. Anais [...]. Vitória: ABRHidro, 2025. Trabalho XXVI-SBRH0945.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO (SINISA). Relatório dos serviços de abastecimento de água: SINISA 2024, ano de referência 2023. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2025.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico temático: serviços de água e esgoto - visão geral: ano de referência 2022. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2023.

TENÓRIO, N. R. V. C.; VIEIRA, P. C.; FÉLIX, A. L. S. S.; BORGES, V. Q.; CAMPOS, J. P. Diagnóstico participativo das condições de saneamento básico em um acampamento de desabrigados em Ouro Preto-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 32., 2023, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: ABES, 2023. Trabalho VIII-1380.

TUFTS UNIVERSITY ENGINEERS WITHOUT BORDERS. Slow sand filtration workshop. Medford, MA: Tufts University, 31 jan. 2009. Apresentação em PowerPoint.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Guidance manual for compliance with the filtration and disinfection requirements for public water systems using surface water sources. Washington, DC: EPA, 1991. Report EPA/823/R-91/102.

VIEIRA, P. C. Sistema simplificado de tratamento de água: FiME seguido de desinfecção - estudo de caso no Acampamento Novo Taquaral (Ocupação Chico

Rei). Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Urbana, 2024.

VIEIRA, P. C.; TENÓRIO, N. R. V. C.; FÉLIX, A. L. S. S.; SEIDL, M.; BORGES, V. Q. Sistema simplificado de tratamento de água em um acampamento de desabrigados em Ouro Preto-MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 32., 2023, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: ABES, 2023. Trabalho I-1470.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Domestic water quantity, service level and health. Geneva: WHO, 2003. 33 p. (WHO/SDE/WSH/03.02).

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Evaluating household water treatment options: health-based targets and microbiological performance specifications. Geneva: WHO, 2011. 68 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: WHO, 2017. 631 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: WHO, 2022. 614 p.

WUTICH, A. et al. Advancing methods for research on household water insecurity: studying entitlements and capabilities, socio-cultural dynamics, and political processes, institutions and governance. Water Security, v. 2, p. 1-10, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasec.2017.09.001.