



## VISÃO GERAL SOBRE A TECNOLOGIA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE RIO NA PRODUÇÃO DE ÁGUA E AS PERSPECTIVAS DE SUA UTILIZAÇÃO NA SABESP

### Eloisa Helena Cherbakian

Graduada em Engenharia Química pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI), MBA em Administração pelo Instituto Mauá, Especialista em Engenharia de Petróleo e Gás pela UNISANTA e Mestre em Engenharia Sanitária pela Escola Politécnica da USP. Em sua trajetória profissional destaca-se a atuação como Gerente de Controle Sanitário, Gerente de Operação nas Estações de Tratamento de Esgotos Suzano e ABC, Coordenadora de Riscos Ambientais e Engenheira na área de Pesquisa e Inovação da Cia de Saneamento - Sabesp.

**Endereço:** Rua Nicolau Gagliardi, 313 – Pinheiros – São Paulo / SP – CEP: 05429-010 – Brasil – Tel: +55 (11) 3388-8080 – e-mail: ehcherbakian@sabesp.com.br.

### RESUMO

A filtração em margem de rio ou *riverbank filtration* (RBF), é uma técnica de captação e tratamento de água, que consiste na construção de poços próximos às margens de rios ou lagos, localizados em aquíferos aluviais ou formações geológicas não consolidadas, cujo bombeamento dos poços induz o fluxo de água do manancial em direção aos mesmos passando por purificação durante o percurso por processos como filtração física, sorção, troca iônica e degradação microbiana. A filtração em margem (FM) tem fornecido resultados positivos podendo ser utilizada como tratamento preliminar ou tratamento único acrescido apenas de desinfecção, conforme qualidade alcançada. Ainda que necessite de tratamento complementar, reduz o consumo de produtos químicos e a geração de lodo na ETA, diminuindo custos operacionais. Apesar dos benefícios, a técnica não é aplicável a todos os locais devendo seu potencial ser previamente avaliado (investigação geológica, hidrogeológica etc). Ainda há a preocupação quanto ao risco de colmatção do meio poroso com diminuição na produção de água. Todos esses aspectos, benefícios técnicos e econômicos, limitações e critérios de aplicação da tecnologia, assim como alguns cuidados operacionais são abordados de forma concisa no presente artigo que finaliza com as perspectivas da companhia de saneamento SABESP em testar a técnica.

**Palavras-chave:** Filtração em Margem de Rio, Pré-tratamento de Água, Carbono Orgânico.

### INTRODUÇÃO

O avanço na degradação da qualidade das águas torna o abastecimento público um grande desafio às companhias de saneamento, isto porque muitos dos mananciais encontram-se poluídos com microrganismos, algas e poluentes de difícil controle e remoção pelos processos convencionais de ciclo completo. A preocupação dos especialistas e técnicos do saneamento se pautam nas crescentes dificuldades operacionais e riscos potenciais pela presença, cada vez mais frequente de contaminantes antes desconhecidos ou que estavam em baixas concentrações e que atualmente demandam soluções e tecnologias de tratamento sofisticadas como os processos oxidativos avançados (POA), a adsorção por carvão ativado e os processos de separação por membranas, elevando os custos do tratamento (SHAMRUKH and ABDEL, 2008; UMAR et al., 2017). Outra grande demanda para o tratamento de águas é a necessidade de redução no consumo de produtos químicos e, conseqüentemente, na geração de lodos, preservando recursos finitos, contribuindo com a sustentabilidade no saneamento.

Dados os novos desafios causados por esse cenário e na busca por tecnologias de fácil aplicabilidade, relativamente baixo custo de implantação, operação e manutenção para contribuir com a melhoria da qualidade da água, a Filtração em Margem (FM) de Rio ou de Lago tem se mostrado um processo promissor para a remoção de turbidez, patógenos, microcontaminantes e matéria orgânica (evitando a formação de subprodutos da desinfecção, como os indesejáveis Trihalometanos – THMs e Ácidos Haloacéticos - AHA), sendo tecnologia praticada na Europa ao longo de rios como Reno, Danúbio, Elba e Sena, entre outros, não limitado mas principalmente na Alemanha (SHAMRUKH and ABDEL, 2008; Jaramillo, 2012), também nos Estados Unidos na América do Norte, se expandindo para outros países e continentes como o asiático em países como China, Índia, Malásia e Korea do Sul [Hamzah et al. (2006),



Shamsuddin et al. (2014), Razak et al. (2015) apud Umar et al. (2017); Jaramillo (2012); Shamsuddin et al. (2018)], e o continente africano, como no Egito (SHAMRUKH and ABDEL-WAHAB, 2008).

A Filtração em Margem (FM) é uma técnica de captação e tratamento de água, que consiste na construção de poços próximos às margens de mananciais (rios ou lagos), localizados em aquíferos aluviais ou formações geológicas não consolidadas, e no bombeamento da água a partir dos mesmos. O bombeamento induz o rebaixamento no nível freático, fazendo com que a água do manancial migre até o poço passando por um processo de purificação natural durante o percurso devido à filtração física e processos como sorção, troca iônica e degradação microbiana. A eficiência do tratamento depende principalmente da geologia do aquífero, composição do fundo do manancial, hidrologia, hidrogeoquímica e tempo de percurso até o poço (RAY et al., 2003 *apud* DALSSASSO E GUEDES, 2018; JARAMILLO, 2012). A FM tem fornecido resultados positivos quanto ao tratamento de água, sendo que dependendo da qualidade de água do manancial, a técnica é utilizada como tratamento preliminar ou como único tratamento, acrescido apenas de desinfecção.

A atenuação dos contaminantes ocorre principalmente nos primeiros 60 cm de profundidade (dependendo da espessura do aquífero) de filtração na superfície do leito do rio via filtragem mecânica, sorção e atividade biológica [SIMPSON e MEIXNER (2012), LEVY e AGNIESZKA (2013), WOJNAR et al. (2013) *apud* UMAR et al. (2017); PAUFLER et al., 2019]. Os locais adequados para a filtração das margens dos rios são os sedimentos fluviais ou aquíferos aluviais, que consistem principalmente em camadas de areia e cascalho [Grischek et al. (2002), Hunt et al. (2002), Jaramillo (2012) *apud* Umar et al. (2017); Grischek et al. (2007)], mas eles também podem estar localizados em zonas de baixa permeabilidade do aquífero aluvial com silte e argila (RAY et al., 2008; HUBBS, 2006a *apud* UMAR et al., 2017).

Em alguns países europeus, como na Alemanha e Holanda este mecanismo de tratamento de água é utilizado de forma eficaz há mais de 100 anos (KUEHN & MUELLER, 2000 *apud* JARAMILLO, 2015). Tornou-se uma técnica eficiente e bem aceita para o tratamento de águas superficiais em muitos desses países europeus, como a Suíça, onde 80% da água potável vem de poços de FM, 50% na França, 48% na Finlândia, 40% na Hungria, 16% na Alemanha e 7% na Holanda [TUFENKJI e RYAN, 2002, RAY et al. (2008), De VET e VAN GENUCHTEN (2009), De VET et al. (2010) *apud* UMAR et al. (2017)]. Outros países como Índia [Ojha (2011), Tyagi et al. (2013) *apud* Umar et al. (2017)], China e Coreia do Sul (Ray et al., 2008 *apud* Umar et al., 2017), Malásia [Hamzah et al. (2006); Shamsuddin et al., 2014; Razak et al., 2015 *apud* Umar et al. (2017)], Egito e Jordânia [Shamrukh e Abdel-Wahab (2011a,b) *apud* Umar et al. (2017)], começaram recentemente a implementar a filtração em margem de rio para abastecimento de água potável. Nos Estados Unidos este método tem sido usado como processo de pré-tratamento para remoção de patógenos microbianos, de precursores de subprodutos da desinfecção como os trihalometanos (THM) e Ácidos Haloacéticos (AHA) e para a remoção de outros contaminantes como alguns fármacos (HISCOCK & GRISCHEK, 2002 *apud* SÁNCHEZ, 2019). O uso da Filtração em Margem pelas concessionárias de água tem aumentado, pois vem provando ser mais eficaz e sustentável em todo o mundo (KIPKEMOI, 2007 *apud* SÁNCHEZ, 2019). Na América Latina a Filtração em Margem pode ter um grande impacto na forma como a água é gerida. No Brasil, a pesquisa acadêmica demonstrou remover a turbidez e a cor aparente da água em uma lagoa usando este método (Rabelo, L., 2006; Sens et al., 2008; Romero, Campos, L.P.S., 2012; Segalla & Luiz, 2012 *apud* Sánchez, 2019; Emmendoerfer et al., 2021a), assim como no bairro Caixa D'Água em Olinda (PE), que capta água nas margens do Rio Beberibe (FREITAS, 2010; PAIVA et al., 2010; EMMENDOERFER et al., 2021b). Na Bolívia, a FM também se mostrou eficaz na remoção de turbidez e sólidos em suspensão na água, bem como de coliformes (CAMACHO and SÁNCHEZ, 2004 *apud* SÁNCHEZ, 2019). A principal vantagem da aplicação da FM é a redução do uso dos métodos tradicionais de tratamento de água, que exigem grandes quantidades de produtos químicos e uma estação de tratamento. De qualquer forma, a Filtração em Margem ainda requer cloração ou outros métodos de desinfecção. Mesmo quando necessita de tratamento complementar, o pré-tratamento através da Filtração em Margem de rio usualmente permite redução no consumo de produtos químicos e na geração de lodo (Emmendoerfer et al., 2021b), aumento nas carreiras de filtração em ETAs e redução nos custos com limpeza de captações convencionais entre outros benefícios.

## OBJETIVO

Apresentar em uma visão geral e concisa, com base em referências bibliográficas, a tecnologia de filtração em margem de rio na produção de água, seja como tratamento principal ou como pré-tratamento de Estação de

Tratamento de Água (ETA), seus benefícios, limitações, metodologias empregadas na identificação de sites adequados à sua implantação, trazendo ainda, uma perspectiva de sua utilização na Sabesp.

## METODOLOGIA UTILIZADA

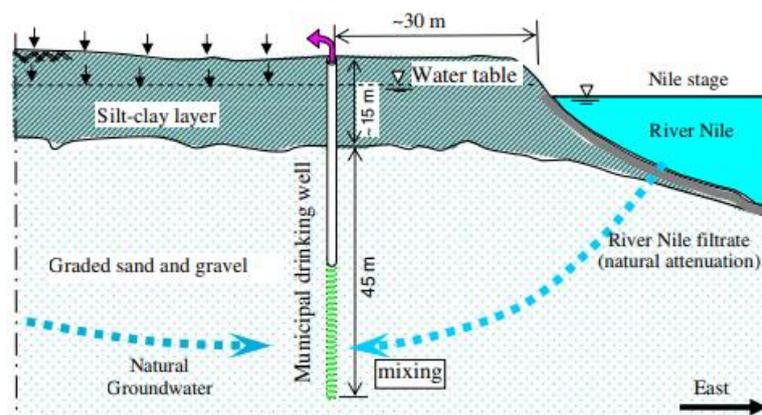
A metodologia utilizada no presente artigo compreendeu o levantamento bibliográfico (fontes secundárias, como artigos, periódicos, jornais, revistas, sites oficiais, monografias, dissertações e teses) referentes:

1. À definição da tecnologia de filtração em margem de rio ou lago.
2. Aos benefícios técnico e econômicos esperados com o uso da tecnologia.
3. Aos critérios de escolha de sites para aplicação da filtração em margem de rio ou lago.
4. Às limitações e restrições, destacando que a primeira experiência sul-americana de que se tem notícia na adoção desta tecnologia em escala para o abastecimento público, é em Santiago de Cali na Colômbia (Sánchez and Rubiano, 2021), ou seja, uma experiência bastante recente para nosso continente.

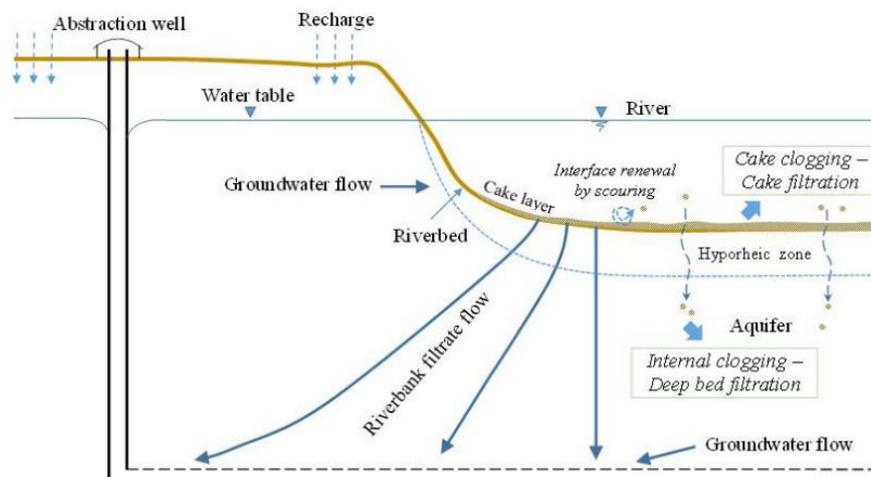
## A TECNOLOGIA DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE RIO OU LAGO

Como já exposto, no processo de filtração em margem de rio, o meio filtrante é o próprio material sedimentar das margens e fundo do manancial e também do aquífero. Ambos os materiais devem ser formados por aluviões, ou por outra formação geológica não consolidada que permita a conexão hidráulica entre a água superficial e a água subterrânea local (DALSASSO E GUEDES, 2018). Essa conexão hidráulica permite que a água do manancial migre até o poço de FM e dependendo das características dos sedimentos do aquífero, a quantidade de água proveniente do manancial que chega até o poço será maior ou menor. A água que chega ao poço, geralmente é uma mistura da água subterrânea originalmente presente no aquífero e da água do manancial infiltrada. A proporção de tal mistura depende principalmente das condições hidrogeológicas locais, da distância entre o poço e a margem do manancial e da vazão bombeada [RAY et al. (2002), HISCOCK and GRISCHEK (2002), MONDARDO (2009) *apud* DALSASSO E GUEDES (2018)].

A configuração do poço em sistemas de FM pode ser vertical ou horizontal. Usualmente, poços verticais são usados para tempos de percurso ou deslocamentos mais longos de modo a se incrementar a eficiência de remoção de contaminantes mais móveis. Poços horizontais geralmente são aplicados para obter maiores vazões de água, mas podem ser desfavoráveis para a qualidade da água devido a tempos de residência mais curtos [Hunt et al. (2003), Ray (2002a) *apud* Gutiérrez, J.P. (2018)], sendo preferidos para bombeamento em aquíferos aluviais rasos (DRISCOLL, 1986 *apud* EPA, 2010). Ressalta Ray (2001a) *apud* EPA (2010), que poços verticais com grandes necessidades de produção não são adequados para aquíferos aluviais rasos porque o baixo rebaixamento necessário para sua boa operação não pode ser sustentado. Nas figuras 1 e 2 são apresentados desenhos esquemáticos de poços verticais e horizontais, respectivamente.



**Figura 1: Seção transversal hidrogeológica da Filtração em Margem do Nilo nos locais de estudo da cidade de Sidfa/Egito. Fonte: SHAMRUKH and ABDEL-WAHAB (2008).**



**Figura 2: Representação geral de um sistema de Filtração em Margem com poços horizontais.**

**Fonte: GUTIÉRREZ, J.P. (2018).**

Conforme literatura técnica, a eficiência da FM depende das condições locais, incluindo a hidrologia e a hidrogeologia do local, a geoquímica da água (do rio e do aquífero), as populações microbianas e a atividade metabólica associada. Esta é a razão pela qual é difícil definir procedimentos gerais para identificar locais apropriados para implementar a técnica de FM, bem como a eficiência esperada do processo. A recomendação da EPA é que se implante pilotos para cada caso pretendido (EPA, 2006).

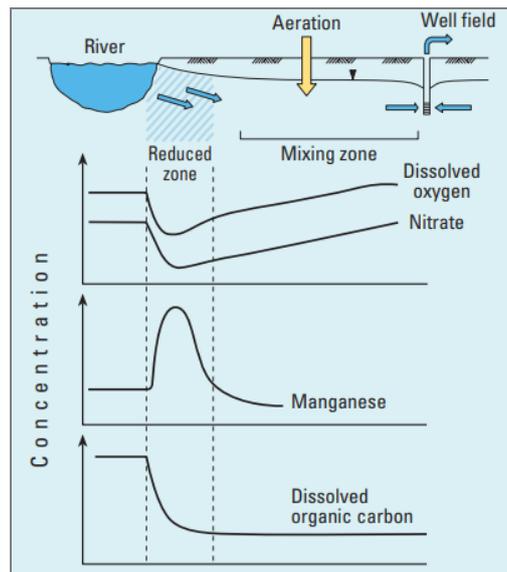
Desta forma, é necessário realizar uma investigação hidrogeológica dos locais onde se pretende que sejam implantados os poços de FM. O processo objetiva avaliar as características hidráulicas do manancial e do lençol freático e avaliar a formação geológica do leito do corpo d'água assim como dos arredores (MONDARDO, 2009; MICHELAN, 2010 *apud* DALSASSO E GUEDES, 2018).

## **BENEFÍCIOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS**

### **Remoção de componentes orgânicos**

A Figura 3 ilustra qualitativamente como o oxigênio se torna empobrecido nos sedimentos do leito depois de apenas alguns metros de filtração, devido à atividade microbiana que promove a degradação de matéria orgânica ou de poluentes orgânicos, criando condições anóxicas (TUFENKJI, RYAN, and ELIMELECH, 2002). Nessas condições, a atividade microbiana de desnitrificação e redução de sulfato diminuem ainda mais a potencial redox do sistema (BIZE, GANET and MANEGLIER, 1981 *apud* TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002). O ambiente altamente reduzido geralmente afeta a estabilidade de revestimentos minerais como óxidos de ferro e manganês, podendo mobilizá-los, deteriorando a qualidade da água (BOURG, 1992 *apud* TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002; GRISCHEK et al. 2007). A uma certa distância da margem do rio, onde a atividade microbiana diminui como resultado de uma deficiência em doadores de elétrons e o aquífero é reaerado, as condições de redução diminuem de intensidade e o manganês e o ferro podem ser removidos da água filtrada em margem por precipitação e adsorção nas superfícies dos grãos que compõem o meio poroso (TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002; JARAMILLO, 2012). Portanto, a largura da zona reduzida pode ser determinada considerando a evolução do manganês e do ferro ao longo do caminho da infiltração (TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002).

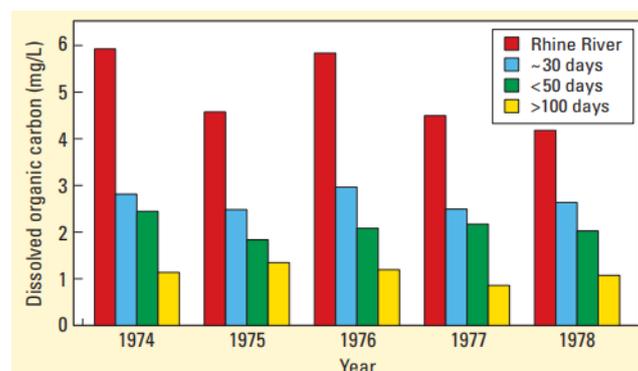
Conforme exposto, se a fração biodegradável de partículas e compostos orgânicos dissolvidos na água do rio causar uma demanda de oxigênio maior do que a concentração de oxigênio dissolvido disponível, condições anóxicas no aquífero podem se desenvolver resultando na dissolução de ferro e manganês (GRISCHEK et al., 2007). O Diagrama da figura 3, apresenta um esquemático da evolução do oxigênio dissolvido, nitrato, manganês dissolvido e carbono orgânico dissolvido no caminho do fluxo de infiltração durante a filtração em margem de rio.



**Figura 3: Alterações na química da água na zona hiporreica**  
Fonte: TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH (2002).

A localização da zona redutora, no entanto, pode exibir variabilidade espacial e temporal devido a flutuações sazonais na atividade microbiana e nos padrões de bombeamento de água no campo do poço (TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002). Um aumento no nível do rio pode resultar em água que se infiltra em uma região anteriormente não saturada, que pode não exibir as mesmas propriedades de remoção que a zona permanentemente saturada (Schubert, 2000 apud TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002; JARAMILLO, 2012).

Desta forma, um benefício verificado em poços de filtração em margem de rio é sua eficiência na remoção de matéria orgânica natural (NOM), um dos principais precursores na formação e especiação dos subprodutos da desinfecção, no presente caso, de certa forma indicado pelo carbono orgânico dissolvido (COD). Embora os resultados dos estudos apresentados na figura 4 remontem a década de 70, estudos posteriores como o de Schmidt et al. (2003) e Paufler et al. (2019), confirmaram tais tendências. Ressaltam Abdelrady et al. (2018) apud Paufler et al. (2019), que condições aeróbias são preferíveis para remoção de matéria orgânica dissolvida, pois a eficiência de remoção pode ser reduzida em 5-10% sob condições anóxicas e em 7-15% sob condições anaeróbias.



**Figura 4: A filtração da margem do rio faz com que as concentrações de COD (medidas em miligramas por litro) diminuam com o tempo de retenção.** Fonte: SONTHEIMER (1980) apud TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH (2002).

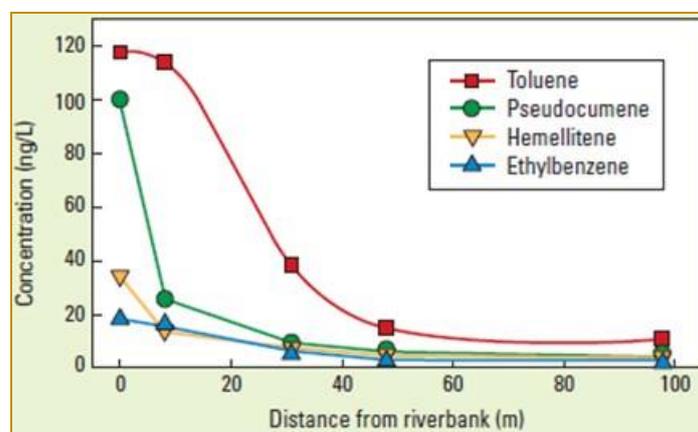
Vários estudos concentraram-se no destino de poluentes orgânicos, como herbicidas, pesticidas, produtos farmacêuticos e compostos odoríferos durante a filtração em margem de rios. Em seu estudo, Juttner (1995)

*apud* Tufenkji, Ryan and Elimelech (2002), investigou a eficiência da filtração em margem de rios na eliminação de compostos odoríferos no rio Ruhr, no centro da Alemanha. No estudo, foi verificado que até 99% dos contaminantes mais polares (por exemplo, linalol, acetato de isobornil e mentol) foram removidos na parte anóxica do aquífero e que compostos odoríferos naturais (geosmin) também foram efetivamente eliminados.

Em um estudo semelhante realizado no rio Neckar, no sudoeste da Alemanha, Juttner (1999) *apud* Tufenkji, Ryan and Elimelech (2002), demonstrou a eficiência da filtragem da margem do rio na redução das concentrações de compostos de fragrâncias (por exemplo, mentol, limoneno,  $\alpha$ -terpineol) e hidrocarbonetos aromáticos. No entanto, Schwarzenbach et al (1983) *apud* Tufenkji, Ryan and Elimelech (2002), também identificaram um grupo de produtos químicos orgânicos (clorofórmio, 1,1,1-tricloroetano, tricloroetileno e tetracloretileno) que eram resistentes à transformação biológica e, portanto, removidos ineficazmente por filtração nas margens dos rios.

Para Tufenkji, Ryan and Elimelech (2002), embora seja sabido que a remoção de contaminantes orgânicos dependa da hidrofobicidade do composto e do teor de carbono orgânico do material aquífero, outros fatores, como a sorção em minerais inorgânicos, a atividade microbiana, a biodegradabilidade, a taxa de infiltração e a diluição nas águas subterrâneas também desempenham um papel importante, de modo que ainda há muita pesquisa a ser feita sobre a tecnologia e seus processos de remoção de poluentes.

A Figura 5 ilustra a importância dos primeiros metros do aquífero em relação à degradação microbiana de contaminantes orgânicos aromáticos.



**Figura 5: Perfis de concentrações de hidrocarbonetos aromáticos durante a filtração das margens do rio Neckar. Fonte: JUTTNER (1999) *apud* TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH (2002).**

Pelo gráfico pode-se verificar que as concentrações medidas em nanogramas por litro diminuíram rapidamente nos primeiros metros de filtragem, mas estabilizaram após 50 metros.

### Comportamento de poluentes inorgânicos

Como já abordado, vários processos de interação controlam o transporte, o destino e a reatividade de poluentes inorgânicos na filtração em margem de rio, incluindo sorção, precipitação, reações redox, complexação com matéria orgânica, degradação microbiana da NOM e diluição (JACOBS et al. 1988, BOURG, DARMENDRAIL, RICOURE, 1989, BOURG and BETIN, 1993, VON GUNTEN and KULL, 1986, VON GUNTEN et al. 1991, DARMENDRAIL, 1988 *apud* TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002). Os efeitos de mecanismos individuais no comportamento de transporte de diferentes metais foram estudados nas margens do rio Glatt (JACOBS et al. 1988, VON GUNTEN et al. 1991 *apud* TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002). Segundo Tufenkji, Ryan and Elimelech (2002), os resultados sugerem que a degradação microbiana da matéria orgânica mobiliza metais, como cobre e cádmio, que são conhecidos por se associarem fortemente à NOM. Por outro lado, metais formadores de óxido, como o manganês, são facilmente mobilizados por causa do potencial redox diminuído e subsequente dissolução reductiva dos oxidróxidos do manganês. Sob condições



mais oxidantes, que normalmente são encontradas no limite externo da interface água de superfície/água subterrânea e a longas distâncias do rio, a sorção ou co-precipitação de óxidos de manganês pode inibir significativamente o transporte de traços de metais (VON GUNTEN and KULL, 1986 *apud* TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002). Adsorção ou a precipitação em sedimentos aquíferos foi identificada como um importante mecanismo de remoção de metais como zinco e cádmio (JACOBS et al. 1988, BOURG and BETIN, 1993, VON GUNTEN et al. 1991, BOURG, DARMENDRAIL, 1992 *apud* TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002).

Segundo Shmidt et al, (2003):

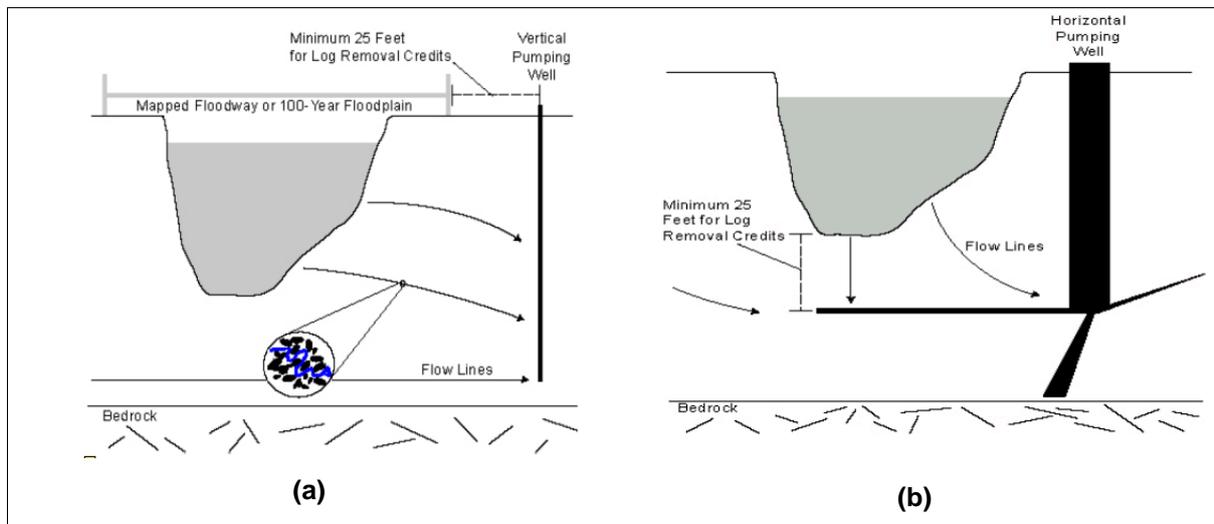
- Para aquíferos aeróbicos, a remoção é conseguida por processos de troca iônica em superfícies carregadas negativamente de minerais argilosos, óxidos férricos amorfos e alumina, e matéria orgânica sólida.
- Em aquíferos anóxicos, a remoção de íons metálicos é dominada por reações de precipitação com sulfeto. As remoções percentuais variam muito para os diferentes elementos, variando de 0 a 94%, mas no geral, as interações com o solo proporcionam uma retenção considerável de metais pesados no subsolo. Vale destacar, entretanto, que assim como citado em outros estudos como de Jaramillo (2012) e Tufenkji, Ryan and Elimelech (2002), se as condições do aquífero se tornarem anaeróbicas, o ferro e o manganês sofrem redução química e aparecem na água, necessitando sua eliminação por tratamento.
- Cloreto e o sulfato geralmente não são afetados pela filtração em margem, mas fosfato pode ser removido por esta etapa de tratamento devido à precipitação na forma de fosfato de cálcio, ferro ou alumínio no solo.
- Em aquíferos aeróbicos, o amônio é transferido para nitrato por nitrificação na presença de oxigênio (também demonstrado por TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002). O nitrato formado pode eventualmente ser desnitrificado sob condições anóxicas.

### Remoção de patógenos

Segundo estudos de Tufenkji, Ryan and Elimelech (2002), vários mecanismos de filtração em margem, que são altamente dependentes do tamanho do patógeno, governam a remoção de partículas. Esses mecanismos incluem sedimentação gravitacional, interceptação e difusão browniana.

Na sedimentação gravitacional, as forças gravitacionais que atuam no micróbio fazem com que ele assente em um "coletor" de grãos. Na interceptação, o tamanho e a trajetória do micróbio são tais que ele encontra o grão do coletor enquanto passa por ele (TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002). Segundo esses autores, a difusão browniana é o mecanismo dominante responsável por colocar os vírus em contato com os grãos de sedimentos devido ao seu pequeno tamanho (geralmente <200 nm). A filtração de patógenos microbianos, como oocistos de *Cryptosporidium* (4-6 µm) e cistos de *Giardia* (9-12 µm), é controlada pela interceptação e sedimentação gravitacional.

Conforme referências, a tecnologia remove eficientemente os coliformes totais e fecais (GUTIÉRREZ et al., 2017; EMMENDOERFER et al., 2021a,b). Entretanto, em Gutiérrez et al. (2017) são destacadas as importâncias do comprimento do caminho de fluxo e dos tempos de residência (quanto mais longo for o caminho do fluxo e o tempo de residência, maior a remoção) e os possíveis efeitos de eventos de inundação que alteram significativamente a eficiência de remoção de patógenos como vírus entre outros. Segundo a EPA (2010) e de forma conservadora, sistemas que usam poços horizontais ou verticais localizados a pelo menos 25 pés da fonte de água de superfície são elegíveis para um crédito de remoção de 0,5 log e aqueles localizados a pelo menos 50 pés da fonte de água de superfície são elegíveis para um crédito de remoção de 1,0 log. Remoções de *Cryptosporidium* superiores a 1,0 log podem ser admitidas através de verificações e demonstrações específicas do local. No caso de poços verticais, o comprimento do caminho de fluxo deve ser determinado usando a distância horizontal medida da borda do corpo d'água superficial até o a tela do poço (vide figura 6a). A borda do corpo d'água de superfície é definida como a borda da planície de inundação de 100 anos ou da via de inundação (EPA, 2010). Nesse mesmo manual, a EPA define que o comprimento do caminho de fluxo para um poço horizontal é a distância vertical medida do leito do rio em condições normais de fluxo até a entrada da lateral mais próxima do poço horizontal (figura 6b).



**Figura 6: (a) Esquema mostrando fluxo generalizado e distância mínima de separação necessária para um poço vertical, e (b) esquema com a distância de separação mínima necessária para um poço horizontal com três laterais, considerando crédito de remoção de 0,5 log para *Cryptosporidium* em ambos os casos. Fonte: EPA (2010).**

Metge et al. (2010) *apud* Gutiérrez et al. (2017) estudaram a eficiência de remoção do parasita *Cryptosporidium parvum* em um sistema RBF composto por sedimentos ricos em óxidos metálicos bem graduados e descobriram que o principal mecanismo de imobilização foi a sorção aos conteúdos de óxidos metálicos (ferro e alumínio).

### Aspecto Econômico

No aspecto Econômico, em estudo piloto realizado na ETA Puerto Mallarino (localizada em Santiago de Cali na Colômbia), que chega a ser paralisada devido às fortes variações na turbidez da água bruta em eventos extremos, foi avaliada a tecnologia de FM com melhora na qualidade da água, redução na geração de lodos e de 50% nos custos operacionais (Gutiérrez, J.P., 2018).

Para Schmidt et al. (2003), os custos para o estabelecimento de filtragem em margens de rio dependem de muitos fatores, incluindo características do aquífero, tipo de instalação de tela de poço (filtro), projeto da instalação e distância da população atendida. No entanto, os custos podem ser classificados como moderados. Também a redução no consumo de produtos químicos, o aumento do tempo de carreira de filtros, a diminuição na geração de lodos, entre outros benefícios ratificam a redução nos custos operacionais (SCHMIDT et al., 2003). No que se refere ao CAPEX, sistemas que utilizam poços verticais são de baixo custo e costumam ser utilizados quando se busca maiores tempos de residência ou tempos de deslocamento mais longos para garantir maior eficiência na remoção dos contaminantes mais móveis (Gutiérrez, J.P. 2018). Já os poços horizontais (de maior complexidade construtiva e custo mais elevado) costumam produzir maiores vazões de filtrado, mas podem ser desfavoráveis para a qualidade da água devido a tempos de residência mais curtos (HUNT et al., 2003; RAY, 2002a *apud* GUTIÉRREZ, J.P. 2018). Se forem comparados gastos de construção com os custos de manutenção do poço, segundo Driscoll (1986) *apud* EPA (2010), embora poços coletores horizontais sejam substancialmente mais caros do que poços verticais, concessionárias moderadamente grandes podem precisar de muitos poços verticais de capacidade menor para corresponder à capacidade de um poço horizontal. A manutenção desses poços verticais pode exigir esforço e despesas significativas (RAY 2001a *apud* EPA, 2019). Em tais casos, os poços coletores horizontais podem ser preferidos.

Conforme relatado por Sharma e Amy (2009) *apud* Gutiérrez, J.P. (2018) e Saph Pani (2011) *apud* Siegfried et al. (2018), a conversão de uma ETA convencional para um processo que inclua um sistema FM pode reduzir os custos operacionais em até 50%.



Em seu estudo de avaliação do potencial de filtração das margens ao longo do rio Barranca em Puntarenas, Costa Rica, Sánchez (2019) verificou, através de modelagem, a possibilidade de extração de 80 L/s em cinco poços e na avaliação do custo operacional, estimou uma redução de 29% nos custos em relação à ETA. O estudo demonstrou o potencial da FM como um método alternativo de pré-tratamento de água com boa relação custo-benefício.

Em Srinagar na Índia, dados do relatório de Água Limpa (Saph Pani - Projeto apoiado pela Comissão Europeia) comparam os custos operacionais por metro cúbico tratado de uma ETA convencional de 2000 m<sup>3</sup>/d (23 L/s) com o sistema de filtração em margem (FM) de 900 m<sup>3</sup>/d (10,4 L/s), e também outro sistema de poços de FM em Haridwar, com capacidade de 61.000m<sup>3</sup>/d (706 L/s). Os resultados confirmaram a vantagem econômica dos sistemas de filtração em margem para o local, conforme figura 7 (SAPH PANI, 2014).

Componente do OPEX	Custo unitário de produção de água (€/m <sup>3</sup> )		
	FM em Haridwar <sup>1</sup> (706 L/s)	FM em Srinagar <sup>2</sup> (10,4 L/s)	Tratamento Convencional de Tratamento de Água <sup>3</sup> (23 L/s)
Pessoal	0,02	0,01	0,02
Operação e manutenção anual, incluindo consumíveis (para desinfecção/ pós tratamento).	0,01	0,01	0,09
Energia Elétrica	0,04	0,02	0,08
<b>Subtotal</b>	<b>0,07</b>	<b>0,04</b>	<b>0,19</b>
Serviço da dívida e depreciação	0,02	0,02	0,13
<b>Total</b>	<b>0,09</b>	<b>0,06</b>	<b>0,32</b>

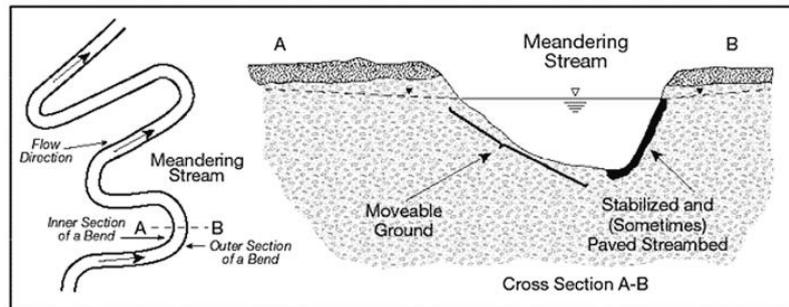
<sup>1</sup> Sistema de FM composto por 22 poços de grande diâmetro em Haridwar, com produção média total de 61000m<sup>3</sup>/d;  
<sup>2</sup> Poço vertical simples de 200 mm, com uma produção média de 900 m<sup>3</sup>/d de água potável.  
<sup>3</sup> Captação superficial seguida de tratamento convencional, com produção média de 2000 m<sup>3</sup>/d.  
<sup>4</sup> Serviços da dívida e depreciação de 20% e 2%, respectivamente, do custo de capital.

Figura 7: Comparação do indicador de custo em euros por m<sup>3</sup> de água tratada.  
Fonte: Adaptado de SAPH PANI (2014).

### Critérios de Aplicação da Tecnologia

Embora a FM em geral tenha grandes vantagens sobre os métodos tradicionais de tratamento de água, não é aplicável em todos os locais devendo seu potencial ser avaliado para cada caso. Geralmente, critérios geomorfológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, entre outros, são considerados na identificação dos sítios. Esses critérios determinam o fluxo da água através do solo, o tamanho das partículas do solo bem como a velocidade de escoamento que também tem grande influência no nível de filtração obtido (FETTER, 2001 *apud* SÁNCHEZ, 2019). Se os critérios no local selecionado não se enquadrarem na faixa aceitável, o fluxo será muito baixo para acompanhar a produção, ou tão alto que não se obtém filtração. Alguns autores propuseram uma metodologia destinada a identificar locais ótimos com base apenas em critérios geomorfológicos (JARAMILLO, 2015 *apud* SÁNCHEZ, 2019).

De acordo com Ray et al. (2011), Schubert (2002) *apud* Sánchez (2019) e Grischek (2007), as curvas internas de rios sinuosos são locais preferidos para a FM se a proporção de água filtrada no poço for alta. Isso porque uma porção maior de água está chegando aos poços devido a uma área de captação maior. Além disso, sedimentos se depositam no lado externo da curva, o que por sua vez diminui a infiltração da água no sistema (figura 8). Nas regiões próximas à seção interna da curva a velocidade do fluxo é menor e pode ocorrer deposição e erosão alternadas, o material do leito do rio permanece móvel. Os meandros do canal do rio são locais preferidos para sistemas de FM quando se deseja elevada proporção de água filtrada nas margens em relação às águas subterrâneas (GRISCHEK et al. 2007).



**Figura 8: Rio sinuoso com leito pavimentado na parte externa da curva e solo móvel na parte interna da curva. Fonte: GRISCHEK et al. (2007)**

Materiais grossos apresentam alta condutividade, o que é necessário em termos de rendimento hidráulico. Para uma filtragem mais natural, o material granular mal selecionado é preferível ao material bem selecionado devido a uma rede mais complexa de espaços porosos (SÁNCHEZ, 2019; GRISCHEK et al., 2007). Além disso, depósitos aluviais maiores e de maiores espessuras armazenam mais água subterrânea e possibilitam caminho mais longo do fluxo desde o sistema fluvial até os poços (JARAMILLO, 2015; HISCOCK & GRISCHEK, 2002 *apud* SÁNCHEZ, 2019).

A modelagem do fluxo de água subterrânea é realizada na maioria dos casos para determinar a viabilidade, sendo que os rendimentos máximos e os tempos de viagem também podem ser determinados por meio de modelagem (W.H. CHIANG and KINZELBACH, 2001a *apud* SÁNCHEZ, 2019). Entretanto, antes de iniciar os estudos de planejamento de localização da área, Grischek et al. (2003) *apud* Grischek et al. (2007) recomendam que se respondam às seguintes perguntas:

- Que quantidade de água deve ser produzida?
- Qual extensão do rio ou área de captação ao longo do rio pode ser usada para a filtração em margem?
- Qual rebaixamento é aceitável nos poços de acordo com a espessura do aquífero e uso da terra?
- Que quantidade de água pode ser retirada continuamente do rio sem conflitos ecológicos?
- Considerando a qualidade da água desejada, qual proporção do filtrado da margem do rio deve ser alcançada na água bruta bombeada?
- Qual vantagem da filtração em margem de rio é considerada a mais importante?

Para fins de avaliação da viabilidade de implantação de Filtração em Margem em um determinado local, algumas premissas básicas postuladas por Grischek et al. (2007) e Grischek and Ray (2009) *apud* Campos (2012), baseados na experiência adquirida em estudos de casos são:

- Solos predominantemente arenosos;
- Estabilidade das margens;
- Silte e argila, em porcentagem reduzida (camada superficial);
- Espessura do aquífero, preferencialmente superior a 10 m (alguns autores citam mínimo de 5m);
- Condutividade hidráulica entre  $10^{-2}$  e  $10^{-4}$  m/s;
- Velocidade média do rio superior a 1,0 m/s;
- Taxa de infiltração em torno de  $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ ;
- COT (carbono orgânico total) e COD inferiores a 8 e 6 mg/L, respectivamente. Esta condição deve ser considerada se não houver dados disponíveis para carbono orgânico dissolvido biodegradável (BDOC).

Observam Grischek et al. (2007) que FM localizada em locais com menor espessura do aquífero ou menor condutividade hidráulica podem ser viáveis, entretanto, a capacidade das instalações poderá ser menor ou serem necessárias técnicas específicas como dutos de drenagem ao longo do rio em vez de poços, já que tais parâmetros influenciam fortemente a possível taxa de captação ao longo de um rio se forem instalados poços verticais.



Os métodos e técnicas mais utilizados nos estudos de filtração de margem de rios, segundo revisão feita por UMAR et al. (2017), são:

- Sistema de Informação Geográfica (GIS) (adequação do local/caracterização da superfície).
- Geofísica (subsuperfície).
- Teste de bombeamento e perfilagem de poço (subsuperfície).
- Técnicas hidroquímicas, geoquímicas e estatísticas (hidroquímica da água).
- Modelagem numérica.
- Técnicas *tracer* e abordagem de isótopo estável (processos de degradação e atenuação de contaminantes).

De seus levantamentos, concluem os autores que hidroquímica, modelagem numérica e teste de bombeamento são os métodos mais usados e populares, enquanto as técnicas geofísicas, GIS e estatísticas são as menos atraentes. No entanto, reforçam que muitos pesquisadores preferem uma abordagem integrada, especialmente porque os estudos de filtração de margem de rios envolvem componentes diversos e inter-relacionados. Como já exposto, a tecnologia de filtração em margem de rio é mais conhecida em países desenvolvidos como os EUA e a maioria dos países europeus. No entanto, vem gradualmente ganhando espaço na Ásia e na África e mais recentemente, encontra-se em implantação na América do Sul, em Cali/ Colômbia. Além das condições locais (hidrologia e hidrogeologia do local, geoquímica da água e populações microbianas com a atividade metabólica associada), outros fatores são a textura e a qualidade do solo (RAY, 2011, MUSTAFA et al., 2014 *apud* UMAR et al., 2017). A textura do solo deve apresentar propriedades de filtragem, razão pela qual as rochas calcárias e dolomíticas, ricas em fissuras que permitem a passagem rápida da água, não são favoráveis para atenuação de contaminantes (UMAR et al., 2017).

Locais adequados para FM são aquíferos de areia e cascalho com condutividades hidráulicas  $k_f > 10^{-4}$  m/s, uma espessura mínima de 5 m (autores como Grischek et al., 2007 e Campos, 2012 recomendam no mínimo 10 m) e uma boa conexão hidráulica com as águas superficiais adjacentes (SHARMA et al., 2009; De VET et al., 2010; SINGH et al., 2010; KUMAR, 2006; TYAGI et al., 2013 *apud* UMAR et al. 2017). A prioridade é dada aos depósitos aluviais por serem pouco consolidados com caminhos tortuosos para que a água se mova do rio para o poço, promovendo assim degradação biológica, transformação química e alteração física dos contaminantes (GRISCHEK e RAY, 2009, RAY, 2011 *apud* UMAR et al., 2017). Outras questões de consideração especial são a temperatura da água e a geometria do local (CALDWELL, 2006, RAY et al., 2011c,d *apud* UMAR et al., 2017). O fato de a condutividade hidráulica depender das propriedades do fluido e do material, os efeitos da temperatura na viscosidade da água afetarão diretamente a taxa de infiltração, pois as mudanças na temperatura podem significar mudanças na viscosidade da água (Sharma et al., 2012 *apud* Umar et al., 2017), além da temperatura afetar a atividade biológica e a reação redox (TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002; JARAMILLO, 2012; RAY et al., 2011c,d *apud* UMAR et al., 2017).

Por outro lado, a geometria do local das instalações de filtração em margem de rio afeta a capacidade do rio de recarregar o aquífero e influencia a intensidade da obstrução do leito do rio. A proximidade do(s) poço(s) com o rio e sua localização em relação às curvas do rio também são fatores importantes na determinação da quantidade de água induzida a infiltrar-se no aquífero a partir do rio (GRISCHEK et al., 2007; JARAMILLO, 2015; UMAR et al., 2017). Os poços de filtração das margens dos rios podem estar localizados ao longo da parte reta das zonas fluviais ou nas curvas externas, porém aqueles localizados nas curvas internas tendem a ser mais produtivos, pois as curvas internas reduzem o efeito do entupimento (colmatação) do leito do rio (GRISCHEK et al., 2007; CALDWELL, 2006, RAY and PROMMER, 2006 *apud* UMAR et al., 2017).

Os poços de filtração em margem de rio também podem estar localizados em zonas de baixa permeabilidade dentro do aquífero aluvial, como em silte e argila, embora os aquíferos aluviais de areia e cascalho sejam mais recomendados (RAY et al., 2008, HUBBS, 2006a *apud* UMAR et al, 2017). Assim, prioridades são dadas aos depósitos aluviais em comparação com outros depósitos geológicos por causa de seus materiais não consolidados com caminhos tortuosos para a água se mover do rio para a tela do poço, promovendo os processos de remoção dos poluentes. Segundo EPA (2010), aquíferos granulares, não consolidados ou parcialmente consolidados e mapeados como antes do aluvião quaternário, devem ser considerados caso a caso pelo estado para determinar se são muito cimentados e, portanto, muito fraturados para fornecer filtragem natural suficiente e que os poços localizados em aquíferos clásticos consolidados (por exemplo,



conglomerados), aquíferos de rocha fraturada e aquíferos de calcário cársico, não são elegíveis para crédito de remoção de patógenos em filtração de margem.

Além disso, a geometria do rio (largura e profundidade) em si influencia o rendimento dos poços de FM. Isto é particularmente verdadeiro em uma área onde a colmatção do leito do rio é relevante (CALDWELL, 2006 *apud* UMAR et al., 2017). O posicionamento e o projeto do sistema FM não dependem apenas de fatores hidrogeológicos, mas, em certa medida, de fatores técnicos, econômicos, regulatórios e de uso do solo (JARAMILLO, 2012). Os dados reportados pelos sistemas da FM indicam que a filtragem das margens dos rios foi implementada com sucesso em rios com descarga média variando de 20 m<sup>3</sup>/d a 3000 m<sup>3</sup>/d e declividade superficial que variou de 0,04 a 1,8 m/km (CALDWELL, 2006 *apud* UMAR et al., 2017).

Outra consideração socioeconômica importante é que, durante a operação dos sistemas de filtração em margem de rios, os níveis de água subterrânea no campo circundante do(s) poço(s) de FM não devem cair abaixo de um valor limite ecologicamente e economicamente justificável (Sharma et al., 2009, Lee and Lee, 2010, Tyagi et al., 2013 *apud* Umar et al., 2017), deve-se garantir que a captação de água não resulte em efeitos adversos ao aquífero (superexploração, danos aos ecossistemas) ou ao rio a jusante do local da FM (SHARMA et al., 2009, TYAGI et al., 2013 *apud* UMAR et al., 2017).

Das conclusões e recomendações do estudo de Umar et al. (2017) acerca da análise da eficácia e popularidade de alguns métodos adotados na avaliação da filtração em margem de rio, destacam-se:

- A avaliação da adequação do local exige esforços de pesquisa envolvendo investigação geológica e hidrogeológica.
- A hidroquímica e a modelagem numérica foram as técnicas predominantes utilizadas, mas verifica-se que a modelagem numérica é principalmente limitada aos países desenvolvidos.
- A extração dos parâmetros hidráulicos do aquífero é feita por meio de técnicas geofísicas e teste de bombeamento, sendo o teste de bombeamento mais utilizado do que a técnica geofísica principalmente em países em desenvolvimento.
- Considerando as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos e técnicas utilizadas, o sucesso futuro da tecnologia de filtração em margem depende de uma abordagem integrada, usando diferentes métodos e técnicas de forma colaborativa, tais como: geofísica, sistema de informação geográfica (GIS), modelagem e análise hidroquímica.
- Vale a pena recomendar uma melhoria no uso de técnicas geofísicas na filtragem de margem de rios por sua confiabilidade e custo-benefício na extração dos parâmetros hidráulicos do aquífero em comparação com outros métodos, como teste de aquífero e perfilação de poço.

### **Limitações da Filtração em Margem**

Os sistemas de FM em todo o mundo demonstraram ser suscetíveis a obstruir durante o seu funcionamento, levando a uma diminuição no rendimento da produção de água. A capacidade de autolimpeza dos sistemas FM é geralmente avaliada em termos de tensão crítica de cisalhamento, que depende das características das partículas do leito, no caso de rios, e da tensão de cisalhamento exercida pela velocidade da água do rio (Grischek et al., 2007; Jaramillo, 2012; Hubbs et al., 2007 *apud* Gutiérrez, J.P. 2018), principalmente quando de eventos que aumentam a velocidade de escoamento, como em chuvas intensas. Entretanto, a capacidade de renovação da taxa de infiltração devido às características da interação leito / camada de sedimento e eventos de inundação, são fenômenos ainda pouco conhecidos segundo grande parte das referências.

Ainda sobre essa questão, alterações no gradiente hidráulico do rio para o aquífero e na condutividade hidráulica dos depósitos aluviais geram alterações na velocidade da água dos poros e no tempo de retenção, o que pode limitar ou alterar a atividade biogeoquímica que ocorre na zona hiporreica (JARAMILLO, 2012).

Como já exposto, as mudanças na temperatura da água afetam não apenas a condutividade hidráulica devido à redução da viscosidade da água, mas também a taxa de processos biogeoquímicos e atividade microbiana, que podem afetar a qualidade final da água filtrada (VANEK, 1997 *apud* JARAMILLO, 2012). Também as flutuações no nível do rio alteram a saturação da água, o teor de biofilmes, a geoquímica e até a estrutura do sistema de filtração em margem, afetando o desempenho do tratamento. Tais variações podem afetar as características de fluxo e transporte de todo o sistema, porque como já exposto, a região insaturada que pode

não ter o mesmo potencial de remoção que a zona saturada, pode ser infiltrada pela água do rio durante um estágio de elevação do nível da água com piora na qualidade da água do poço produtor (GRISCHEK et al., 2007; SCHUBERT *apud* JARAMILLO, 2012).

Segundo Hiscock e Grischek (2002) *apud* Dalsasso e Guedes (2018), a constituição do meio em que a água percola, pode influenciar na qualidade da mesma quanto ao aumento da dureza, concentração de amônia, ferro dissolvido e manganês, formação de sulfetos de hidrogênio e outros compostos com mal odor, resultado da alteração das condições de oxidação-redução. As interações biogeoquímicas que ocorrerão no processo da filtração em margem, dependem de vários fatores: a mineralogia e forma do aquífero; as concentrações de oxigênio e nitrato nas águas superficiais; tipos de matéria orgânica nos ambientes de águas superficiais e subterrâneas e uso da terra na bacia hidrográfica local (JARAMILLO, 2012; HISCOCK e GRISCHEK, 2002 *apud* DALSSASSO E GUEDES, 2018).

Como também já mencionado anteriormente, uma importante limitação associada à FM é a obstrução ou entupimento do meio poroso. Existem quatro tipos de entupimento: mecânico, físico, biológico e químico. A **obstrução mecânica** é definida como o bloqueio do fluxo através de meios porosos devido ao aprisionamento de gás. O gás aprisionado que é liberado ou dissolvido no meio poroso pode alterar a permeabilidade do meio, impedindo assim que a água atravesse o aquífero (GRISCHEK et al., 2007; EPA, 2010; ZHOU et al, 2010 *apud* JARAMILLO, 2012). Os microrganismos produzem uma variedade de gases pouco solúveis, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) (JARAMILLO, 2012). No entanto, raramente foi relatado que o O<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub> se acumulam no solo (BAVEYE, 1998 *apud* JARAMILLO, 2012). Segundo Jaramillo (2012), o gás nitrogênio produzido pela desnitrificação e o metano produzido durante a metanogênese, foram ainda identificados como os gases mais prevalentes assim aprisionados.

A **obstrução física** é causada pela percolação contínua da água do rio contendo matéria em suspensão devido ao bombeamento do poço (GRISCHEK et al., 2007; EPA, 2010; SCHUBERT, J., 2006a *apud* JARAMILLO, 2012). Esse processo é governado pela dinâmica do rio (escoamento, erosão, transporte e sedimentação), a qualidade da água do rio, a localização dos poços relacionados à geomorfologia do rio e a distância entre o poço e a margem do rio (GRISCHEK et al., 2007; SCHUBERT, J., 2006b *apud* JARAMILLO, 2012). A velocidade de sedimentação de partículas finas no interior dos poros do aquífero depende não apenas das propriedades físicas dos sedimentos (tamanho, peso, etc.), mas também da velocidade da água (descarga do rio) e viscosidade (HUBBS, S. A, 2006a *apud* JARAMILLO, 2012). Isso significa que uma partícula se assentará mais facilmente em um rio de baixa vazão e baixa viscosidade. Essas barreiras zonais também podem ser criadas pelo inchamento de minerais argilosos, principalmente montmorilonita (MONAGHAN et al., 1959 *apud* PRZYBYŁEK, DRAGON and KACZMAREK, 2017).

A **obstrução biológica** é causada pelo acúmulo excessivo de biomassa no leito do rio (ENGESGAARD, P., Seifert, D. and HERRERA, P., 2006 *apud* JARAMILLO, 2012). Presume-se que a distribuição da biomassa seja uniforme como um biofilme que cobre as superfícies dos grãos, no entanto, verificou-se que os microrganismos crescem em micro colônias e que tampões de biomassa, em vez de biofilmes, são responsáveis pelo *bioclogging* (GÓRSKI et al., 1993, SZYPER and DANIELAK, 1993 *apud* PRZYBYŁEK, DRAGON and KACZMAREK, 2017; SEIFERT, D. and ENGESGAARD, P., 2007 *apud* JARAMILLO, 2012).

A **obstrução química** é causada pela precipitação de compostos nos poros do aquífero. Alguns fatores que, imagina-se, possam influenciar a obstrução química são as concentrações de ferro, amônia e nitrato, e a dureza da água (CALDWELL, 2006 *apud* JARAMILLO, 2012). Altas cargas de substâncias biodegradáveis na água do rio podem levar à obstrução química devido a fortes mudanças no potencial redox e nos valores de pH, o que pode causar a precipitação de substâncias nos poros do aquífero (PRZYBYŁEK, DRAGON and KACZMAREK, 2017; SCHUBERT, 2002a *apud* JARAMILLO, 2012). Essa é a razão pela qual alguns autores se referem à obstrução bioquímica. Em geral, a colmatação bioquímica ocorre abaixo da área de infiltração, onde predomina a obstrução mecânica (SCHUBERT, 2006b *apud* JARAMILLO, 2012).

Assim, resumidamente, uma limitação da eficiência da FM é a obstrução do leito e das margens do rio, o que diminui a condutividade hidráulica na zona hiporreica. Esse entupimento pode ser causado pela infiltração de sedimentos finos, aprisionamento de gás, formação de biofilme relacionado à atividade microbológica ou



precipitação e co-precipitação de compostos inorgânicos, sendo o primeiro deles o fator mais influente na formação da obstrução (JARAMILLO, 2012).

Reitera-se que a obstrução pode ser limitada ou removida pelo potencial de autolimpeza do rio, onde o principal processo de limpeza é o resultado das forças de cisalhamento transmitidas pelo movimento da água que flui para o rio e da resistência ao movimento fornecido pelo próprio leito do rio, que é uma função da inclinação do rio, do perfil de velocidade vertical e do transporte de sedimentos (HUBBS, 2006a *apud* JARAMILLO, 2012). No entanto, em alguns casos, sedimentos maiores formam uma espécie de armadura que impede a ressuspensão de sedimentos do leito pela ação das ondas de inundação (STUYFZAND, JUHASZ-HOLTERMAN and DE LANGE, 2006 *apud* JARAMILLO, 2012). Outros fatores importantes para evitar a obstrução, segundo Grischek et al. (2007), são a taxa de infiltração determinada pela taxa de bombeamento e localização do poço ao longo da margem, bem como a turbidez da água do rio e matéria orgânica particulada. Os autores reiteram que a partir de experiências de longo prazo, taxas médias de infiltração inferiores a 0,2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.dia) sobre o leito do rio garantiram condições estáveis de infiltração.

Alertam Grischek et al. (2007) que outro fator a ser considerado é a presença de altas concentrações de matéria orgânica particulada na água do rio (por exemplo, algas, flocos de efluentes domésticos, entrada de águas residuais de fábricas de papel e celulose e produção de açúcar) que também podem causar o bioentupimento do leito do rio e unir as partículas de sedimentos e que para essas condições, é necessária uma tensão de cisalhamento mais alta para remover a camada de obstrução. A concentração de amônia na água do rio, segundo esses mesmos autores, deve ser baixa para evitar o consumo adicional de oxigênio ao longo do caminho de fluxo no aquífero de modo a evitar a formação de condições anóxicas, especialmente se ocorrer dissolução de ferro, manganês ou arsênio.

Assim, ao olhar para os vários tipos de processos de purificação ocorridos no aquífero durante a filtração de margem, surge a dúvida se esses processos serão esgotados. Estudo na Polônia conduzido por PRZYBYLEK, DRAGON and KACZMAREK (2017), mostra a dificuldade com a colmatação do meio. Nele foi verificada a deterioração da eficácia da infiltração causada pela obstrução do leito do rio no campo de poços de Krajkowo que fornece água potável para a cidade de Poznań (Polônia) durante e após a longa seca hidrológica entre os anos de 1989 e 1992. Para Grischek et al. (2007), alguns sistemas ineficientes foram fechados na Europa devido a problemas de entupimento ou qualidade da água resultantes de localização ou operação inadequada. Mas ressaltam os autores, que a maioria dos sistemas opera bem há décadas.

Da mesma forma, Schmidt et al. (2003) relata que a filtração em margem de rio é utilizada na Alemanha há décadas em vários locais, fazendo uso de diferentes características do subsolo e nenhuma perda de capacidade de purificação foi observada. Ressaltam os autores que apesar das consideráveis flutuações de qualidade das águas superficiais, os processos naturais sempre voltaram ao normal (mesmo após interrupções temporárias) e nenhum acúmulo alarmante de poluentes persistentes pôde ser verificado pela investigação de vários subsolos usados para filtração em margem.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Do exposto, percebe-se que quando as características hidrogeológicas e biogeoquímicas são favoráveis, a técnica da filtração em margem de rio tem se mostrado bastante promissora por sua simplicidade construtiva (em caso de poços verticais) e operacional, boa eficiência, estabilidade e custos relativamente baixos (especialmente no caso dos poços verticais).

Prioridades são dadas aos depósitos aluviais em comparação com outros depósitos geológicos por causa de seus materiais não consolidados com caminhos tortuosos para a água se mover do rio para a tela do poço, promovendo os processos de remoção dos poluentes. De qualquer forma, cuidados devem ser adotados na operação dos poços, assim como monitoramentos adequados para evitar a superexploração e colmatação precoce do meio.

No geral, a literatura relata como benefícios alcançados em muitos sistemas implantados:



- Melhoria e estabilidade na qualidade da água bruta, maior resiliência a impactos provocados por variações sazonais, por eventos climáticos extremos e por eventos com derrames acidentais próximos às captações.
- Em alguns casos, dispensa da necessidade de qualquer tratamento adicional, ou, por segurança, utilização da FM como pré-tratamento para melhorar a qualidade da água a ser tratada por processo convencional.
- Redução nos custos operacionais, dada a redução no consumo de produtos químicos e consequentemente na geração de lodo, sendo considerada uma tecnologia verde.
- Aumento nas carreiras de filtração nas ETAs, gerando economia operacional.
- Redução nos custos com limpeza de captações.
- Maior probabilidade de captação de forma ininterrupta durante todo o ano.

Com base nas referências consultadas, percebe-se que embora a prática da filtração em margem de rio tenha sido usada na Europa há mais de um século, o entendimento atual dos processos e mecanismos por trás dessa técnica ainda é bastante empírico. Além disso, seu uso em escala em países tropicais é quase inexistente, razão pela qual a Sabesp deve iniciar no segundo semestre de 2022, estudos visando a identificação de sites para implantação de dois pilotos na bacia do Paraíba do Sul, de modo a testar a tecnologia adquirindo conhecimentos sobre a potencialidade da mesma naquela região.

Em se comprovando seus benefícios, é intenção prosseguir-se com a identificação de locais potenciais para sua aplicação nos municípios operados, criando-se uma grande base de dados para estudos e projetos futuros, contribuindo com a disseminação e implantação de tecnologia verde no saneamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAMPOS, L.P.S. Filtração em Margem no tratamento de água: avaliação da aplicação da técnica no manancial da lagoa do Peri, Santa Catarina, e análise prévia de viabilidade de aplicação em Rio Grande, Rio Grande do Sul. Universidade Federal de Santa Catarina, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Trabalho de Conclusão de Curso, 2012.
2. DALSSASSO, R. L.; GUEDES, T. L. Manual de operação e manutenção de sistemas de tratamento de água por filtração em margem. Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), 2018.
3. EMMENDOERFER, M. L.; MARTINS, M.; PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M.B.D.; SIGNORI, A.M.; SENS, M.L. *A review of seventeen years of bank filtration in Brazil: results, benefits and challenges - Part 1: state of Santa Catarina*. Revista DAE. São Paulo. v. 69, n 233 / pp (130-148). Ed. Esp. Nov. 2021a.
4. EMMENDOERFER, M. L.; MARTINS, M.; PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M.B.D.; SIGNORI, A.M.; SENS, M.L. *A review of seventeen years of bank filtration in Brazil: results, benefits and challenges - Part 2: states of Pernambuco and Minas Gerais*. Revista DAE. São Paulo. v. 69, n 233 / pp (149-163). Ed. Esp. Nov. 2021b.
5. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 40 CFR Parts 9, 141, and 142 *National Primary Drinking Water Regulations: Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule; Final Rule*. January 5, 2006. Disponível em: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2006-01-05/pdf/06-4.pdf>. Acesso em 20/09/19.
6. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule Toolbox Guidance Manual*. April 2010. [www.epa.gov/safewater](http://www.epa.gov/safewater). Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1009JLI.txt>. Acesso em: 26/04/2022.



7. FREITAS, Dayana Andrada. O Emprego da Técnica de Filtração em Margem para Tratamento da Água do Rio Beberibe, Região Metropolitana do Recife. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2010.
8. GRISCHEK, T., SCHUBERT, J., JASPERSE, J.L., STOWE, S.M., COLLINS, M.R.. *What is the appropriate site for RBF? Proceedings Of The 6th International Symposium On Managed Artificial Recharge Of Groundwater, ISMAR6. Phoenix, Arizona/USA. october 28 - november 2, 2007 (466-474).* Disponível em: [https://dinamar.tragsa.es/pdf/AquiferRecharge\\_ISMAR6.pdf](https://dinamar.tragsa.es/pdf/AquiferRecharge_ISMAR6.pdf). Acesso em: 16/05/2022.
9. GUTIÉRREZ, J. P. *Riverbank filtration in highly turbid rivers.* (2018). Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aa6fe2afd-1f34-4b03-9687-1a5b627b64c2>. Acesso em 10/08/2019.
10. GUTIÉRREZ, Juan Pablo; VAN HALEM, Doris and RIETVELD, Luuk. *Riverbank filtration for the treatment of highly turbid Colombian rivers. Drinking Water Engineering and Science*, 10, 13–26, 2017.
11. JARAMILLO, Marcela. *Evaluation of the Potential for Riverbank Filtration in Colombia. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en Ingeniería – Recursos Hidráulico, pela Universidad Nacional de Colombia/ Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.* Medellín/ Colombia. 2015.
12. JARAMILLO, Marcela. *Riverbank filtration: an efficient and economical drinking-water treatment technology. Ingeniería, Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.* Dyna, year 79, Nro. 171, pp. 148-157. ISSN 0012-7353. 2012.
13. PAIVA et al. Filtração em margem para indução de recarga e melhoria da qualidade de água - Estudo de caso: rio Beberibe. Mar.2010. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/274021739\\_Filtracao\\_em\\_margem\\_para\\_inducao\\_de\\_recarga\\_e\\_melhoria\\_da\\_qualidade\\_de\\_agua\\_-\\_Estudo\\_de\\_caso\\_rio\\_Beberibe](https://www.researchgate.net/publication/274021739_Filtracao_em_margem_para_inducao_de_recarga_e_melhoria_da_qualidade_de_agua_-_Estudo_de_caso_rio_Beberibe). Acesso em 18/09/2019.
14. PAUFLER, Sebastian; GRISCHEK, Thomas; ADOMAT, Yasmin; OTTER, Philipp; VREDENBREGT, Leo; NAGY-KOVÁCS, Zsuzsanna; TILL, Gábor; HAAS, Robert; OPITZ, Rüdiger; JÄHRIG, Jeannette; WICKE, Daniel; MIEHE, Ulf; KRUC, Roksana; GORSKI, Jozef; DRAGON, Krzysztof; SALAMON, Endre; GODA, Zoltán. D1.6: *Advantages and limitations, impact of BF design, recommendations for operators. National University of Public Service (NUPS). Project AquaNES.* Ref. Ares (2019)3432297 - 25/05/2019. Disponível em: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c4060312&appId=PPGMS>. Acesso em 12/05/2022.
15. PRZYBYŁEK, DRAGON and KACZMAREK. *Hydrogeological investigations of river bed clogging at a river bank filtration site along the River Warta, Poland. Geologos* 23, 3 (2017): 201–214. doi: 10.1515/logos-2017-0021. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/322670739\\_Hydrogeological\\_investigations\\_of\\_river\\_bed\\_clogging\\_at\\_a\\_river\\_bank\\_filtration\\_site\\_along\\_the\\_River\\_Warta\\_Poland](https://www.researchgate.net/publication/322670739_Hydrogeological_investigations_of_river_bed_clogging_at_a_river_bank_filtration_site_along_the_River_Warta_Poland). Acesso em 20/09/19.
16. RABELO, Letícia. Estudos preliminares para implantação da filtração em margem na Lagoa do Peri de pré-tratamento de água para remoção de fitoplâncton. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.



17. SÁNCHEZ, L.D.T. and RUBIANO, E.L.Q. *Filtración En Lecho De Río - Una antigua y vigente tecnología de captación de agua. La experiencia en desarrollo en la ciudad de Cali, pionera para Colombia y América del Sur.* La Palabra/ Universidad Del Valle. 25 noviembre, 2021. Disponível em: <https://lapalabra.univalle.edu.co/tema-central-filtracion-en-lecho-de-rio/>. Acesso em 16/05/2022.
18. SÁNCHEZ, Mark Kaleb Jones. *Evaluation of the potential for bank filtration along the Barranca river in Puntarenas, Costa Rica. Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción.* Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería en Construcción. Cartago, Junio 2019.
19. SAPH PANI. *Enhancement of natural water systems and treatment methods for safe and sustainable water supply in India. Deliverable D1.4 - Report on bank filtration economics and cost estimates. Project supported by the European Commission within the Seventh Framework Programme Grant agreement N° 282911.* Dresden - Alemanha, 2014. Disponível em: [http://www.saphpani.eu/fileadmin/uploads/Administrator/Deliverables/Saph\\_Pani\\_D1.4\\_Report\\_on\\_bank\\_filtration\\_economics\\_and\\_costestimates.pdf](http://www.saphpani.eu/fileadmin/uploads/Administrator/Deliverables/Saph_Pani_D1.4_Report_on_bank_filtration_economics_and_costestimates.pdf). Acesso em 20/09/19.
20. SCHMIDT, Carsten K.; LANGE, Frank Thomas; BRAUCH, Heinz-Jürgen; KÜHN, Wolfgang. *Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany. DVGW-Water Technology Center (TZW). Karlsruhe Straße 84, D-76139 Karlsruhe, Germany, 2003.* Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/267779083\\_Experiences\\_with\\_riverbank\\_filtration\\_and\\_infiltration\\_in\\_Germany](https://www.researchgate.net/publication/267779083_Experiences_with_riverbank_filtration_and_infiltration_in_Germany). Acesso em 20/09/19.
21. SENS, M.L. et al.. *Filtração em margem como pré-tratamento de águas poluídas por toxinas, microrganismos e microcontaminantes: subprojeto avaliação da filtração em margem como pré-tratamento à filtração direta descendente na remoção de cianobactérias e cianotoxinas.* Relatório de Atividades, Edital 5 do Prosab, Tema 1. Rio de Janeiro: FINEP, 2008.
22. SHAMRUKH, Mohamed Æ and ABDEL-WAHAB, Ahmed. *Riverbank filtration for sustainable water supply: application to a large-scale facility on the Nile River. Clean Techn Environ Policy* (2008). Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/225691998\\_Riverbank\\_filtration\\_for\\_sustainable\\_water\\_supply\\_Application\\_to\\_a\\_large-scale\\_facility\\_on\\_the\\_Nile\\_River](https://www.researchgate.net/publication/225691998_Riverbank_filtration_for_sustainable_water_supply_Application_to_a_large-scale_facility_on_the_Nile_River). Acesso em 2/09/2019.
23. SIEGFRIED, Konrad; OTTER, Philipp; GRISCHEK, Thomas; BARTAK, Rico; WANG, Shangqing. *D1.2: Design of bank filtration schemes and coupled engineered solutions. Project AquaNES. Ref. Ares(2018) 4067052 - 01/08/2018.* Disponível em: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5bcaa5bbc&appId=PPGMS>. Acesso em 20/05/2022.
24. TUFENKJI, Nathalie; RYAN, Joseph N. and ELIMELECH, Menachem. *The PROMISE of Bank Filtration. A simple technology may inexpensively clean up poor-quality raw surface water. American Chemical Society - Environmental Science & Technology.* November 1, 2002; 423A–428A.
25. UMAR, Da’u Abba, RAMLI, M. F., ARIS, A. Z., SULAIMAN, W. N. A., KURA, N. U., TUKUR, A.I. *An overview assessment of the effectiveness and global popularity of some methods used in measuring riverbank filtration. Journal of Hydrology* 550 (2017) 497 – 515. March 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.021>. Acesso em 26/04/2022.