



Investigação preliminar da qualidade da água e da litologia visando o uso da filtração em margem no semiárido pernambucano

Preliminary investigation of water quality and lithology aiming at the use of bank filtration in semiarid of Pernambuco

Raquel Ferreira do Nascimento^a, Lucas Caitano da Silva^b, Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral^a, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva^{a,b}

^a Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências-CTG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil-PPGEC. Avenida da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil. CEP: 50740-550. E-mail: raquel.ferreiran@ufpe.br, jaime.cabral@ufpe.br, anderson.paiva@ufpe.br.

^b UFPE, Centro Acadêmico do Agreste-CAA, PPGECAM. Avenida Marielle Franco, s/n, Bairro Nova Caruaru, Caruaru, PE, Brasil. CEP: 55014-900. E-mail: lucas.caitano1@gmail.com, anderson.paiva@ufpe.br.

ARTICLE INFO

Recebido 16 Mai 2023

Aceito 26 Jun 2024

Publicado 22 Jul 2024

ABSTRACT

Providing sufficient and quality water, especially in semi-arid regions, is challenging. In Bank Filtration (FM), physical, chemical, and biological processes improve water quality during its passage through soil sediments and can be an alternative to the problem. This study aimed to evaluate the potential application of FM in Orocó, Santa Maria da Boa Vista, and Petrolândia. To this end, physical-chemical analyses of water quality were carried out in the São Francisco River in two ways: biweekly, on-site, between February and June 2021, and by the continuous analysis by Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), which took place every six months between 2015 and 2020. The soil lithology near the river was also assessed using the SIAGAS system and SPT surveys. In the three cities, the river presented water quality outside the potability standard established by Ordinance No. 888/2021 regarding physical-chemical parameters, not being a limiting factor for the use of the FM technique, as it tends to improve water quality. water. The soil of Santa Maria da Boa Vista is clayey, making using FM impossible. In Orocó, the soil is composed of weathered rocks, which does not preclude the use of the technique. Still, rotary drilling is necessary to determine the municipality's potential for using FM, which is worth investigating in future studies. According to preliminary data, Petrolândia has an extensive layer of sand, which is a promising lithological feature for the use of FM.

Keywords: Electrical conductivity, groundwater, hydrogeology, São Francisco River, water treatment.

RESUMO

O fornecimento de água em quantidade e qualidade suficientes, sobretudo em regiões como o semiárido, é um desafio. Na Filtração em Margem (FM), processos físicos, químicos e biológicos melhoram a qualidade da água durante sua passagem pelos sedimentos do solo, podendo ser uma alternativa para a problemática. Neste estudo, objetivou-se avaliar o potencial de aplicação da FM em Orocó, Santa Maria da Boa Vista e Petrolândia. Para isso, realizou-se análises físico-químicas de qualidade da água no rio São Francisco de duas formas: quinzenalmente, *in loco*, entre fevereiro e junho de 2021; e pela análise contínua da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), ocorrida semestralmente entre 2015 e 2020. Também foi feita a avaliação da litologia, de solo próximo ao rio, pelo sistema SIAGAS e por sondagens SPT. Nas três cidades, o rio apresentou qualidade da água fora do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria nº 888/2021 quanto aos parâmetros físico-químicos, não sendo um fator limitante ao uso da técnica da FM, visto que ela tende



Journal of Environmental Analysis and Progress © 2016
is licensed under CC BY-NC-SA 4.0

a melhorar a qualidade da água. O solo de Santa Maria da Boa Vista é argiloso, o que impossibilita o uso da FM. Em Orocó, o solo é composto por rochas intemperizadas, o que não inviabiliza o uso da técnica, mas é necessária uma perfuração rotativa para determinar o potencial do município no uso da FM, o que vale a pena ser investigado em estudos futuros. Pelos dados preliminares, Petrolândia apresenta uma camada extensa de areia, sendo uma característica litológica promissora para o uso da FM.

Palavras-Chave: Água subterrânea, condutividade elétrica, hidrogeologia, Rio São Francisco, tratamento de água.

Introdução

Devido às ações antrópicas, a qualidade dos corpos hídricos tem sido prejudicada, desencadeando uma séria preocupação a nível global a respeito da disponibilidade de água. A demanda mundial por água potável cresce vertiginosamente a uma taxa de aproximadamente 1% por ano, o que tem aumentado a necessidade da busca por fontes de captação em lugares cada vez mais distantes e/ou por técnicas de tratamento cada vez mais sofisticadas e econômicas (UNESCO, 2018).

Para as regiões semiáridas, as condições climatológicas agravam a problemática da disponibilidade de recursos hídricos. Para que uma região seja considerada semiárida, deve-se atender três critérios: “precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm, índice de aridez de Thorntwaite igual ou inferior a 0,50, e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60% considerando todos os dias do ano” (SUDENE, 2021).

Assim, técnicas alternativas mais eficientes e econômicas para o tratamento da água têm sido investidas, como a Filtração em Margem (FM). A FM é uma tecnologia que consiste na purificação da água por meio de sua passagem pelas camadas sedimentares das margens e do fundo de um manancial superficial. Esse deslocamento da água ocorre devido à diferença do gradiente hidráulico entre o nível de água do manancial superficial e o lençol freático, causado artificialmente pela aplicação de bombas em poços localizados às margens da fonte superficial. Dessa forma, a água bombeada é uma mistura entre as águas superficiais e subterrâneas (Ray et al., 2002).

A dinâmica de melhoria da qualidade da água na FM ocorre por processos físicos, químicos e biológicos, que incluem filtração, reação ácido-base, oxidação, redução, hidrólise, reações bioquímicas, entre outros mecanismos (Sahu et al., 2019). Por meio de todos esses processos, a FM é capaz de atenuar naturalmente sólidos em suspensão, partículas, compostos biodegradáveis, bactérias, vírus, parasitas e compostos adsorvíveis, além de manter o equilíbrio das mudanças de temperatura (Hiscock & Grischek, 2002), podendo ser utilizada, pelo menos, como um pré-tratamento da água.

Por todos esses benefícios, a FM apresenta-se como uma alternativa de tratamento de água que pode solucionar o problema do abastecimento de água direto do manancial superficial poluído e da superexploração da água subterrânea, visto que a água extraída do poço da FM é resultante da mistura entre as águas superficiais e subterrâneas (Cady et al., 2013).

Como, no processo de FM, o meio filtrante é o próprio material sedimentar das margens e fundo do manancial, este material deve ser composto por aluviões ou outra formação geológica não consolidada, que permita a conexão hidráulica entre a água superficial e a água subterrânea local (Funasa, 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 vazão de água proveniente do manancial que chega até o poço será alterada.

Como a água bombeada no poço da FM é resultante da mistura entre as águas superficiais e subterrâneas, a qualidade da água dos mananciais de origem e a proporção de mistura entre elas também são fatores predominantes na eficiência dessa técnica. Em geral, a água superficial é mais deteriorada que a água subterrânea, assim, maior proporção da água subterrânea tende a melhorar a qualidade da água resultante na FM (Glorian et al., 2018).

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi avaliar a condição hidrogeológica e a qualidade da água de pontos pré-selecionados nos municípios de Orocó, Santa Maria da Boa Vista e Petrolândia, situados na região semiárida do estado de Pernambuco, visando analisar o potencial de aplicação da FM nessas cidades.

Material e Métodos

Área de estudo

Entre os municípios localizados na bacia hidrográfica do rio São Francisco, Orocó, Santa Maria da Boa Vista e Petrolândia, inseridos no Submédio São Francisco, foram escolhidos para a realização do projeto (Figura 1). A definição dos locais de investigação foi compartilhada com a equipe da companhia de abastecimento de água do Estado de Pernambuco, COMPESA. Além da

avaliação da implementação da técnica de FM em um rio de maiores dimensões para o Estado.

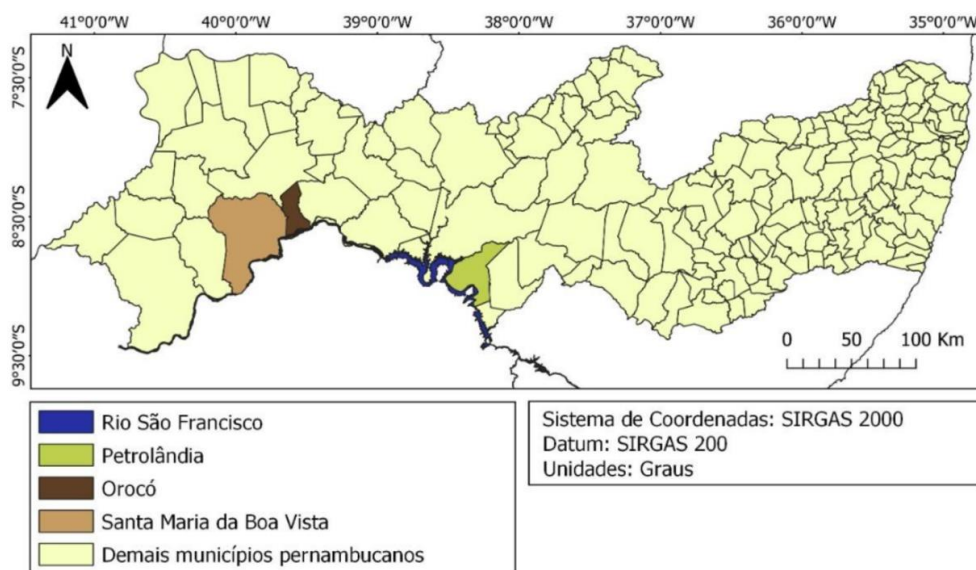


Figura 1. Localização de Orocó, Santa Maria da Boa Vista e Petrolândia no Estado de Pernambuco. Fonte: Nascimento et al. (2023).

As coletas de amostras de água foram realizadas nas três cidades. Inicialmente, três pontos de estudo foram usados para a coleta da água: um situado na cidade de Orocó (O1) e dois no município de Santa Maria da Boa Vista (S1 e

S2). Depois, mais dois pontos de coleta foram usados para a coleta de água na cidade de Petrolândia (P1 e P2). Na Tabela 1 são apresentados o tipo de água coletada nos pontos de coleta e seus respectivos municípios.

Tabela 1. Características dos pontos de coleta para análise da qualidade de água bruta. Fonte: Nascimento et al. (2023).

Ponto	Coordenadas	Tipo de água	Município
O1	8°37'25.23"S e 39°35'54.30"O	Água bruta superficial	Orocó
S1	8°48'1.55"S e 39°50'34.74"O	Água bruta superficial	Santa Maria da Boa Vista
S2	8°48'34.92"S e 39°49'33.00"O	Água bruta superficial	
P1	8°59'10.30"S e 38°14'46.57"O	Água bruta superficial	Petrolândia
P2	8°59'12.73"S e 38°14'42.50"O	Água bruta subterrânea	

Dados hidrogeológicos

Visando a identificação de poços construídos às margens do rio São Francisco e a verificação dos seus perfis de sondagem, dados preliminares do solo foram levantados por meio da plataforma SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2021) para as três cidades avaliadas (Orocó, Santa Maria da Boa Vista e Petrolândia). A numeração dos poços utilizados seguiu os indicados nos perfis do SIAGAS.

Depois da análise preliminar do solo, foram realizados quatro furos de *Standard Penetration Test* (SPT) no município de Santa

Maria da Boa Vista no mês de maio de 2021. O serviço foi terceirizado, empresa contratada que seguiu os procedimentos conforme NBR 6484 (ABNT, 2001). As perfurações do solo foram realizadas próximo aos pontos de coleta S1 e S2. Em cada área, foram escolhidos dois pontos para a perfuração dos furos: a 5 e 15 metros das margens do rio.

Análises de qualidade da água

A análise de qualidade da água foi realizada nos três municípios às margens do rio São Francisco. Os dados físico-químicos foram obtidos de duas formas: pela análise contínua da

Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) na região e pela visita a campo realizada durante o experimento. A Tabela 2

mostra os parâmetros de qualidade da água fornecidos pela COMPESA e os obtidos in loco com o uso de equipamento portátil.

Tabela 2. Fonte dos parâmetros físico-químicos avaliados. Fonte: Nascimento et al. (2023).

Fonte	Parâmetro
Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA)	Cor, turbidez, nitrato, ferro, manganês, condutividade elétrica e pH
<i>In loco</i> (multiparâmetro)	Condutividade elétrica, pH, oxigênio dissolvido e temperatura

As primeiras informações foram obtidas por meio de relatórios técnicos gerados pela COMPESA no monitoramento contínuo da qualidade da água no ponto de captação do manancial nas três cidades em estudo. As coletas foram realizadas entre os anos de 2015 e 2020, uma vez a cada semestre. Os parâmetros analisados foram o pH, condutividade elétrica, turbidez, cor, nitrato, ferro (Fe) e manganês (Mn) (Tabela 2). Durante as visitas a campo, que ocorreram entre fevereiro e junho de 2021, também foram realizadas medições *in situ* com sonda multiparâmetros (condutividade elétrica, pH, oxigênio dissolvido e temperatura) nos pontos de coleta, a cada quinze dias. Todas as análises foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Para as aferições dos parâmetros *in loco*, foi usada a sonda multiparamétrica ASKO AK88.

Resultados e Discussão

Dados hidrogeológicos

Orocó e Santa Maria da Boa Vista

Por meio da análise dos poços cadastrados na plataforma SIAGAS (CPRM, 2021), verificou-se que todos os poços que continham perfis de sondagem estavam a mais de 800 m das margens do rio São Francisco. Os dados litológicos preliminares apresentaram uma camada de pequena espessura de solo não consolidado, tanto para o município de Orocó quanto para Santa Maria da Boa Vista (Tabela 3), o que inviabilizaria o uso da FM. Porém, devido ao distanciamento dos poços com o rio, o perfil de sondagem dos poços cadastrados no SIAGAS poderia não estar demonstrando a camada de aluvião na região. Por esse motivo, realizou-se a perfuração de furos de sondagem às margens do rio São Francisco em Santa Maria da Boa Vista para investigar essa possível camada. Em Orocó, não foi possível a investigação por SPT devido ao solo composto por seixos, tal técnica inviabilizou realizar os procedimentos para atingir maiores profundidades.

Tabela 3. Litologia de perfis selecionados próximos ao rio São Francisco, nas cidades de Orocó e Santa Maria da Boa Vista. Fonte: CPRM (2021).

Cidade	Poço	Profundidade do solo (m)		Tipo de solo
		De	Até	
Orocó	2600002848	0	2	Solo
		2	39	Rocha cristalina
	2600002849	0	3	Rocha intemperizada e decomposta
		3	50	Rocha cristalina
	2600002850	0	3	Solo arenoso
		3	50	Rocha cristalina
	2600008183	0	50	Rocha cristalina
	2600008184	0	6	Solo arenoso
		6	60	Micaxisto
	2600008185	0	6	Solo argiloso
6		60	Micaxisto	
Santa Maria da Boa Vista	2600010426	0	2	Solo
		2	39	Rocha cristalina
		3	6	Rocha intemperizada e decomposta
	2600004235	6	40	Rocha cristalina
		0	3	Solo

	3	50	Rocha cristalina
2600004237	0	3	Solo
	3	50	Rocha cristalina
2600004238	0	3	Solo
	3	50	Rocha cristalina
2600004242	0	3	Solo
	3	50	Rocha cristalina
2600010046	0	3	Solo
	3	50	Rocha cristalina
2600004408	0	3	Solo arenoargiloso
	3	50	Rocha cristalina
2600008225	0	8	Rocha cristalina
	8	60	Micaxisto
2600008227	0	4	Rocha cristalina
	4	22	Micaxisto
	22	60	Gnaisses
2600008228	0	6	Solo argiloso
	6	60	Micaxisto
2600010141	0	6	Solo arenoso
	6	30	Granito
	30	51	Rocha cristalina
	0	3	Solo
2600010440	3	6	Rochas intemperizadas e decompostas
	6	50	Rocha cristalina
2600010441	0	50	Rocha cristalina
2600010444	0	50	Rocha cristalina

Os dois primeiros furos de SPT (F1 e F2) foram realizados próximos ao ponto S1, a 5 m e 15 m da margem do rio, respectivamente (Figura 2). O

terceiro e o quarto furos de sondagem (F3 e F4) foram feitos próximo ao ponto S2, a 5 m e 15 m da margem do rio, respectivamente (Figura 3).

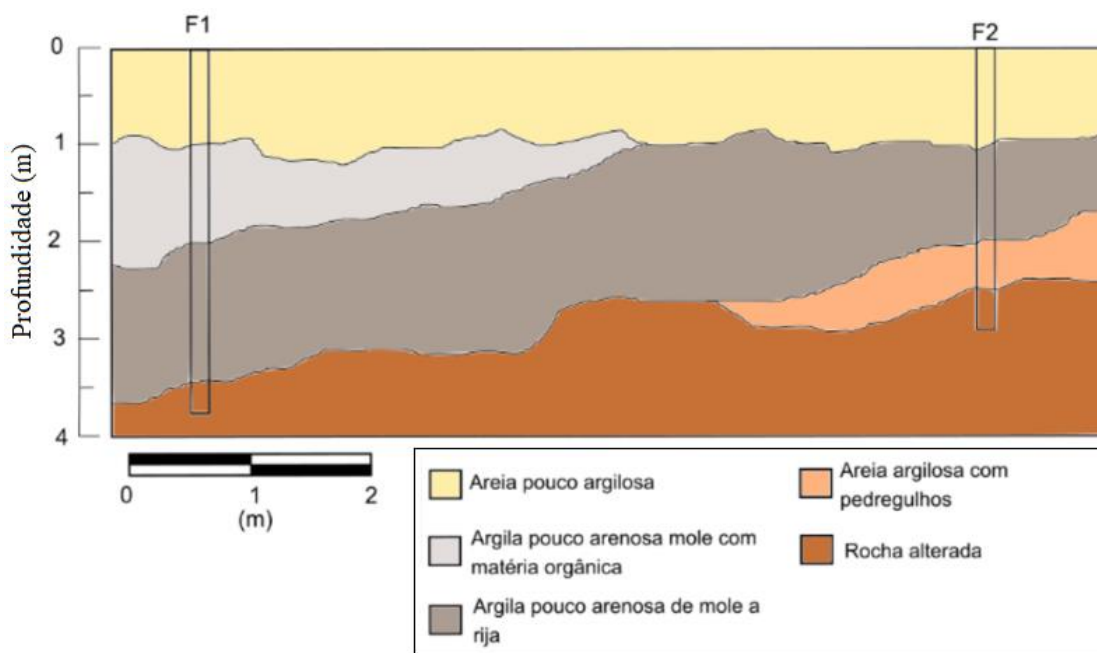


Figura 2. Perfil litológico próximo ao ponto S1, em Santa Maria da Boa Vista. Fonte: Nascimento et al. (2023).

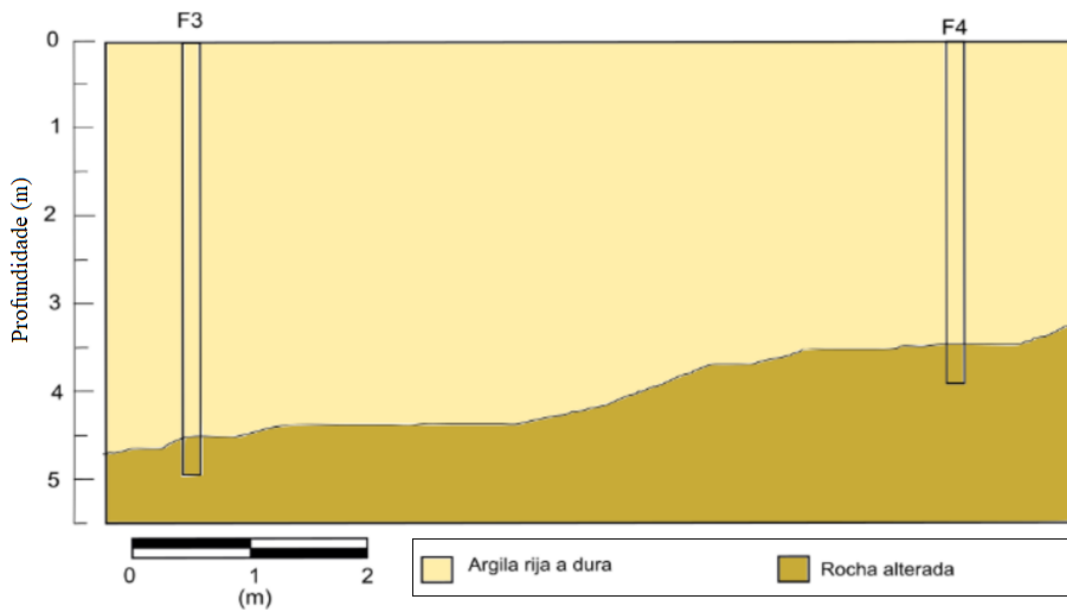


Figura 3. Perfil litológico próximo ao ponto S2, em Santa Maria da Boa Vista. Fonte: Nascimento et al. (2023).

Na realização do SPT, não foi detectado o nível da água no solo e verificou-se que a litologia da região é predominantemente argilosa (Figuras 3 e 4). Não é adequado implementar poços em áreas com camadas espessas de confinamento com baixa condutividade hidráulica porque a água bombeada seria principalmente subterrânea. A maioria dos poços de FM são localizados em aquíferos aluviais de areia e cascalho com condutividade hidráulica maior que $1 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ e espessura variando entre 5 e 60 m (Grischek, Schoenheinz & Ray, 2002). Assim, o perfil litológico de Santa Maria corroborou com os dados da CPRM (2021) (Tabela 3), e confirmou a inviabilidade de implantação de um sistema de FM nesses trechos do rio São Francisco. Anteriormente, a ausência de água nestes furos de sondagens foi um indicativo de não haver conexão hidráulica com o rio.

No caso de Orocó, não foi possível definir a potencialidade do município no uso da FM porque, segundo FUNASA (2018), na escolha do local de implantação da técnica, é importante que o rio apresente areia ou seixo rolado no fundo, que foi o solo mais superficial encontrado às margens do rio São Francisco assim como no leito do rio. Dessa forma, para a definição do potencial desse

ponto de estudo, é necessária a perfuração do solo à rotação para identificar o solo e a conexão hidráulica entre o rio e o aquífero.

Petrolândia

Para a cidade de Petrolândia, também foi feito o levantamento dos poços cadastrados no SIAGAS (Tabela 4). O tipo de solo influencia na remoção bacteriana na FM, sendo notáveis as taxas de eficiência encontradas para solos vulcânicos, de areia fina, pedra-pompe e rochas altamente intemperizadas (Ahmed & Marhaba, 2016). Murshed et al. (2020) verificaram a influência do tamanho dos grãos na eficiência da FM na remoção da cor, turbidez e sólidos suspensos. O estudo foi realizado em escala laboratorial em três tipos de colunas de solos: areia, cascalho e areia com cascalhos. Os autores concluíram que o tipo de solo influencia a técnica na remoção dos contaminantes e que as colunas de solo de areia e areia e cascalho se sobressaíram em relação ao meio filtrante preenchido por cascalho. Solos com maior porcentagem de finos em sua composição têm maior área superficial específica, o que tende a aumentar a capacidade de filtração do solo (Sahu, Dash & Pradhan, 2022).

Tabela 4. Perfil litológico do solo às margens do rio São Francisco em Petrolândia. Fonte: CPRM (2021).

Poço	Distância até a margem (m)	Profundidade (m)		Tipo de solo
		De	Até	
2600001578	115	0	1	Areia média
		1	29	Arenito médio
2600001579	85	0	2	Areia média
		2	23	Arenito médio
2600001582	2169	0	1	Areia média
		1	106	Arenito médio

		0	98	Arenito médio
2600001608	1540	98	128	Argilito
		128	200	Arenito médio
2600005141	45	0	24	Arenito médio

Além dos dados verificados pelo SIAGAS, a bacia sedimentar Jatobá é delimitada pelo Rio São Francisco/Represa de Itaparica em seu limite oeste (Silva & Lima, 2023), ou seja, a cidade de Petrolândia é atravessada por este aquífero. Assim, a cidade de Petrolândia apresenta, previamente, potencial para a aplicação da técnica da FM, visto que tem solo predominantemente arenoso às margens do rio.

Qualidade da água

Cor e turbidez

Os índices de turbidez e cor encontrados na água bruta do rio São Francisco nas cidades de

Orocó, Santa Maria da Boa Vista e Petrolândia podem ser vistos na Figura 4. Segundo a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde (MS) (Brasil, 2021), a água deve ter turbidez menor que 5 uT para ser considerada potável. Com exceção de duas análises, a maioria das coletas realizadas em Orocó e Santa Maria da Boa Vista (O1 e S2) demonstrou turbidez maior que o limite indicado pela Portaria nº 888/2021 do MS. Enquanto praticamente todas as de Petrolândia estiveram abaixo do limite, sendo necessário a observação dos demais parâmetros de qualidade da água.

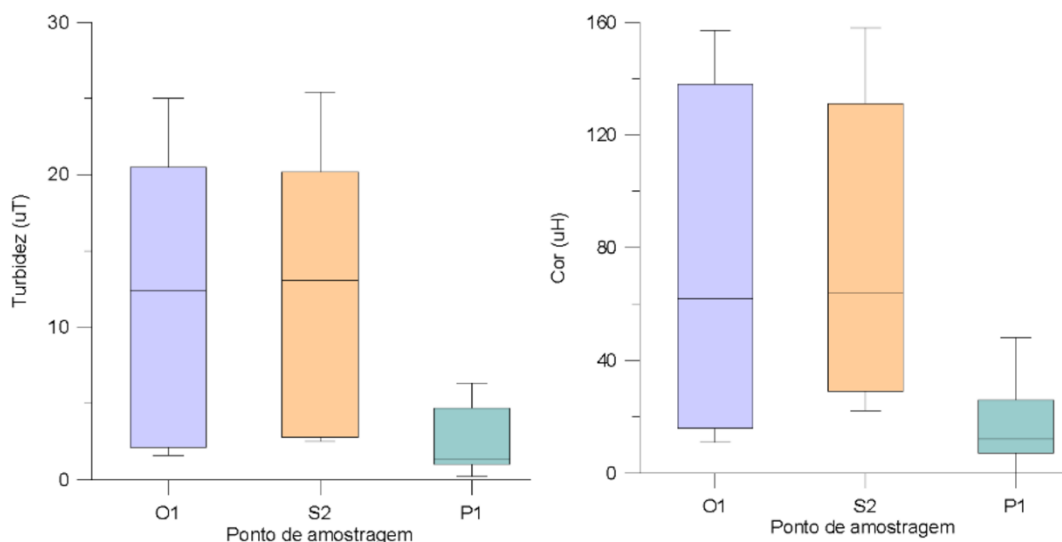


Figura 4. Qualidade da água bruta do rio São Francisco, de maio de 2015 a maio de 2020. (a) Turbidez; (b) Cor. Fonte: Nascimento et al. (2023).

Barbosa et al. (2021) avaliaram a qualidade da água do Rio São Francisco em 16 pontos do Submédio São Francisco, inclusive nas cidades de Santa Maria da Boa Vista e Orocó. As coletas foram realizadas nos períodos seco e chuvoso entre os anos de 2018 e 2019. A turbidez da água do rio variou de 1,37 a 7,89 uT nos pontos investigados, sendo a média de 2,53 uT, o que corrobora com os baixos valores encontrados no estudo para cor e turbidez.

Quanto maior a concentração de sólidos suspensos na água superficial, maior a capacidade da FM em remover os sólidos (Gutiérrez, Halem & Rietveld, 2017). Porém, diversos estudos comprovaram a eficiência da FM na remoção do parâmetro mesmo nas margens de rios que apresentam turbidez relativamente baixa. Freitas et

al. (2017) analisaram a remoção de turbidez em dois poços de FM localizados nas margens do rio Beberibe em Recife – PE. No rio, a turbidez variou entre 16,3 e 158,0 uT, enquanto as águas coletadas nos dois poços tiveram variação de turbidez entre 0,05 e 0,3 uT.

Wahaab, Salah & Grischek (2019) também avaliaram a remoção da turbidez em 3 poços de FM ao longo do rio Nilo, no Egito. Apesar de a turbidez do rio ser relativamente baixa (variando entre 0,3 e 8,5 uT), notou-se que houve remoção dos sólidos durante a FM, apresentando médias de turbidez de 0,24; 0,38 e 0,36 uT nos três poços.

No estudo realizado por Nagy-Kovács et al. (2019), no rio Danúbio, na Hungria, houve uma remoção de mais de 99% da turbidez da água do poço da FM, com relação à água do rio. A turbidez

do rio apresentou, em média, 12,5 uT, enquanto a turbidez da água filtrada variou entre 0,05 e 0,07 uT.

Além da qualidade da água do manancial superficial, existem outros fatores que interferem na eficiência da remoção de turbidez na FM. O tempo de residência entre o poço e o reservatório é uma característica relevante para a remoção de turbidez (Dash et al., 2010). Dessa forma, embora a turbidez do rio São Francisco seja baixa, com pequenas flutuações, esse fator não é limitante para a implantação da técnica na região, e pode ser uma alternativa eficiente para garantir que água oriunda do rio tenha um padrão de potabilidade caso seja implantado o poço a uma distância suficiente para a remoção dos sólidos e demais potenciais contaminantes.

Com relação à cor, o limite indicado pela Portaria nº 888/2021 do MS (Brasil, 2021) na água potável é de 15 uH. Em Santa Maria da Boa Vista e Orocó, como era de se esperar, nas duas coletas em que os níveis de turbidez ficaram dentro do limite estabelecido para a potabilidade, a cor também apresentou índices menores, porém, em geral, não chegou a atingir os 15 uH (Figura 4). Em Petrolândia, a cor da água esteve dentro do padrão de potabilidade na maioria das análises.

Guedes et al. (2017) verificaram a eficiência na remoção da cor em um sistema de FM às margens do rio Belo, no município de Orleans – SC. Durante o estudo, o rio apresentou cor média de 146,1 uH, enquanto a água tratada teve uma cor média de 0,8 uH. Freitas et al. (2017) também analisaram a remoção de cor em dois poços de FM

localizados nas margens do rio Beberibe em Recife-PE, e verificaram que a cor da água dos poços apresentou reduções satisfatórias com relação à água do rio. Dragon et al. (2018) determinaram uma redução de 42-47% na cor da água do poço com relação à água do rio em um sistema de FM na Polônia, devido à remoção da matéria orgânica presente na água superficial.

Da mesma forma que a turbidez, a cor também pode ser um parâmetro eficientemente removido pela FM, e apresentar níveis dentro do limite estabelecido pelas normas brasileiras, sem que necessite de um pós-tratamento para a água.

Oxigênio dissolvido e pH

Embora o oxigênio dissolvido (OD) não seja limitado pela Portaria nº 888/2021 do MS (Brasil, 2021), esse parâmetro é extremamente importante para o funcionamento da FM. Durante a FM, os níveis de OD tendem a diminuir devido a processos como a biodegradação, e condições anóxicas no aquífero podem provocar a elevação das concentrações de manganês, ferro, amônio e arsênio (Noh et al., 2022).

Na Figura 5 visualiza-se o OD e o pH médios nas três cidades avaliadas no semiárido pernambucano. Com exceção do ponto de coleta S1, todos os demais tiveram a concentração de OD acima de 5,7 mg.L⁻¹. O ponto de coleta S1 está localizado em um trecho do rio São Francisco que sofre de eutrofização, e chegou a atingir OD igual a 2 mg.L⁻¹ durante as coletas, quando estava totalmente preenchido por macrófitas (Figura 6).

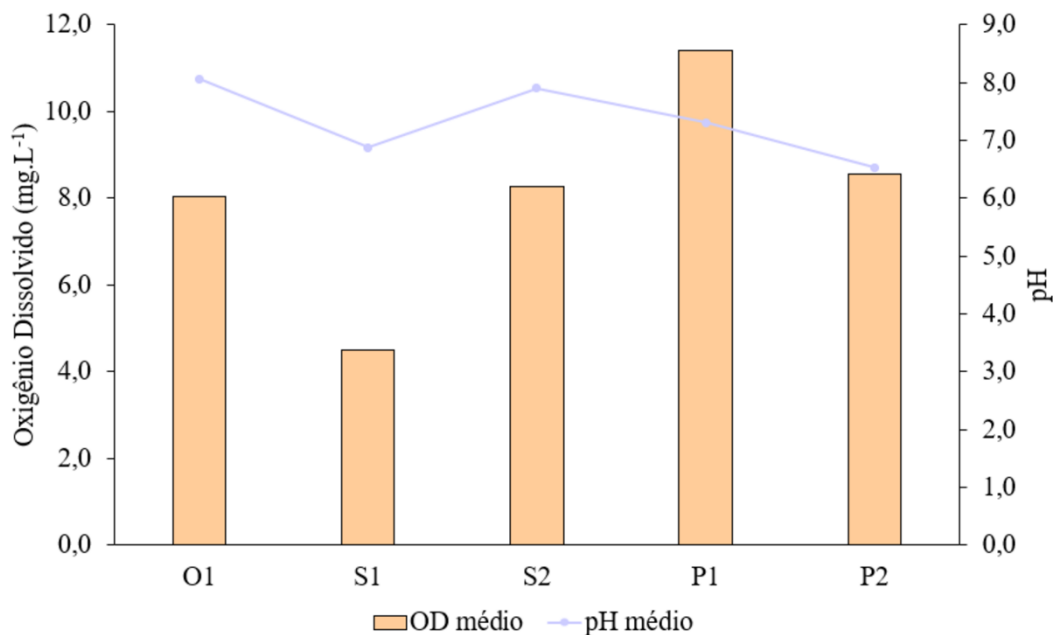


Figura 5. Oxigênio dissolvido e pH médios dos pontos de coleta, de maio de 2015 a junho de 2021. Fonte: Nascimento et al. (2023).



Figura 6. Eutrofização no ponto de coleta S1 (em destaque). Fonte: Nascimento et al. (2023).

Na passagem da água entre o rio e os poços de bombeamento, pode ocorrer o desenvolvimento de zonas redox a depender da distância entre o poço e as margens do rio, da quantidade de carbono orgânico presente nas águas superficiais e subterrânea e do conteúdo de oxigênio da água do rio (Ray, 2002). Esse fenômeno ocorre devido à matéria orgânica presente nas águas de origem que é consumida pelas bactérias presentes na subsuperfície, causando redução nos níveis de oxigênio dissolvido (OD), e, conseqüentemente, aumento das concentrações de nitrito e dissolução do Fe e do Mn (Ray, 2002). Assim, a eficiência da FM na remoção de determinados parâmetros depende diretamente do OD nas águas. Como os

níveis de OD no rio Francisco são altos, esse é um ponto favorável para o uso da técnica de FM às suas margens.

Condutividade elétrica e temperatura

A condutividade elétrica (CE) média da água do rio São Francisco e a temperatura média nas três cidades estudadas estão demonstradas na Figura 7. Os valores apresentados no Rio São Francisco são baixos, apenas o ponto P2, de água subterrânea, que possui concentração de sais mais elevada, condição esta comum de se observar no semiárido. No entanto, com valores bem abaixo do que se encontra nos aquíferos cristalinos do semiárido pernambucano. Embora não apresente limites estabelecidos por normas brasileiras para a água potável, a CE é um importante parâmetro a ser medido em regiões semiáridas porque, devido às altas temperaturas, a água tende a evaporar e as concentrações dos sais na água aumentarem, podendo atingir os grandes cursos de água, como as fontes subterrâneas. Um estudo realizado na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, em Minas Gerais, revelou que as características litológicas e climáticas da região favorecem o intemperismo químico da água. Isso resulta em uma elevada liberação de íons dissolvidos e intensos processos de evaporação, aumentando a concentração de substâncias dissolvidas na água (Machado et al., 2024). Apesar deste rio representar ainda uma grande fonte de água doce.

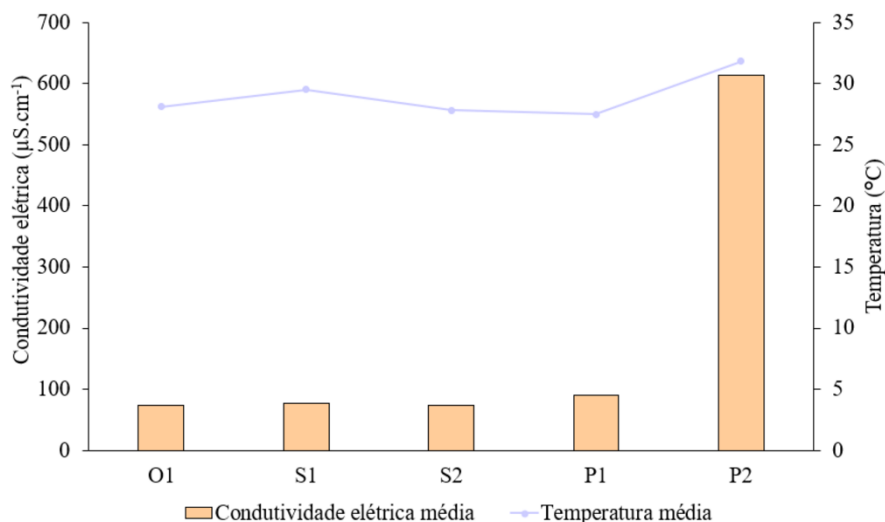


Figura 7. Condutividade elétrica média e temperatura média dos pontos de coleta do rio São Francisco, de maio de 2015 a junho de 2021. Fonte: Nascimento et al. (2023).

Como é típico de uma região semiárida, a temperatura da água não apresentou grandes variações, estando, em todas as coletas, entre 25 e 34 $^{\circ}\text{C}$.

Altas temperaturas causam maiores atividades microbianas, que conseqüentemente

ocasionam condições anóxicas no meio (Ahmed & Marhaba, 2016). Além disso, mudanças na temperatura da água podem interferir na taxa de infiltração porque a viscosidade da água diminui com o aumento da temperatura, que causa aumento na condutividade hidráulica (Santos et al., 2011).

Esse parâmetro é indiscutivelmente importante, porém, no Brasil, sobretudo nas regiões Norte e Nordeste, a amplitude de temperatura das águas superficiais e subterrâneas é pequena (Paiva et al., 2010), consequentemente, essa variável não tende a trazer mudanças na eficiência da FM nesses locais.

Porém, a condutividade elétrica depende da temperatura, da concentração iônica e dos tipos de íons presentes na água (Shamsuddin et al., 2014). Alguns estudos demonstram que a condutividade elétrica deve aumentar da água do rio para o poço de produção da FM (Paiva et al., 2010; Thakur, Singh & Ojha, 2012; Sahu et al., 2019). Ao passar pelo solo, a água absorve alguns solutos que causam o aumento da condutividade elétrica e da alcalinidade durante a FM (Thakur, Singh & Ojha, 2012). Além dos sais serem elementos que não ficam filtrados pelo solo.

Além dos processos que ocorrem na passagem da água pelo solo, em seu estudo, Sahu et al. (2019) determinaram que a condutividade elétrica na FM deve aumentar com o aumento do tempo de detenção e operação, aumento da porcentagem de partículas finas no solo, aumento da profundidade do leito do solo e diminuição do gradiente hidráulico.

Porém, devido à localização da fonte do rio São Francisco (Minas Gerais), a água apresenta uma condutividade baixa quando comparada a outros rios de regiões semiáridas. Abbasi-Moghadam et al. (2021) avaliaram a CE da água do rio Gorganroud, no Irã, uma região também semiárida, e encontrou uma condutividade média de 860 $\mu\text{mho.cm}^{-1}$. Wahaab, Salah &

Grischek (2019) verificaram a condutividade elétrica do rio Nilo, no Egito, que também tem clima semiárido. A água apresentou condutividade entre 273 e 461 $\mu\text{mho.cm}^{-1}$, com média de 322 $\mu\text{mho.cm}^{-1}$. Nas amostras coletadas do rio São Francisco, todas estiveram abaixo de 125 $\mu\text{mho.cm}^{-1}$ (Figura 7).

Por outro lado, a água subterrânea na cidade de Petrolândia (P2) apresentou condutividade elétrica elevada ($> 600 \mu\text{mho.cm}^{-1}$), que pode estar relacionada ao tipo de solo da região associado à alta taxa de evaporação típica desse tipo de clima. Dessa forma, a mistura entre a água subterrânea e superficial durante a técnica de FM pode resultar em um aumento da condutividade elétrica da água filtrada. Como não se têm informações precisas acerca da profundidade do poço investigado nem do seu perfil litológico, é necessário analisar mais profundamente o solo e a água subterrânea da cidade de Petrolândia antes da instalação de um poço de FM nesta cidade.

Nitrato, ferro e manganês

As concentrações de nitrato e ferro na água bruta do rio São Francisco nas cidades de Orocó, Santa Maria da Boa Vista e Petrolândia estão demonstradas na Figura 8. Existem duas origens principais que podem causar grandes concentrações de nitrato na água: antropogênica (agricultura intensa com uso típico de fertilizantes minerais ou dejetos animais, infiltração de esgoto, lixiviado de fazendas e indústrias químicas) e natural (escoamento superficial de florestas/pastagens e depósitos geológicos de sais de nitrato) (Gupta et al., 2015).

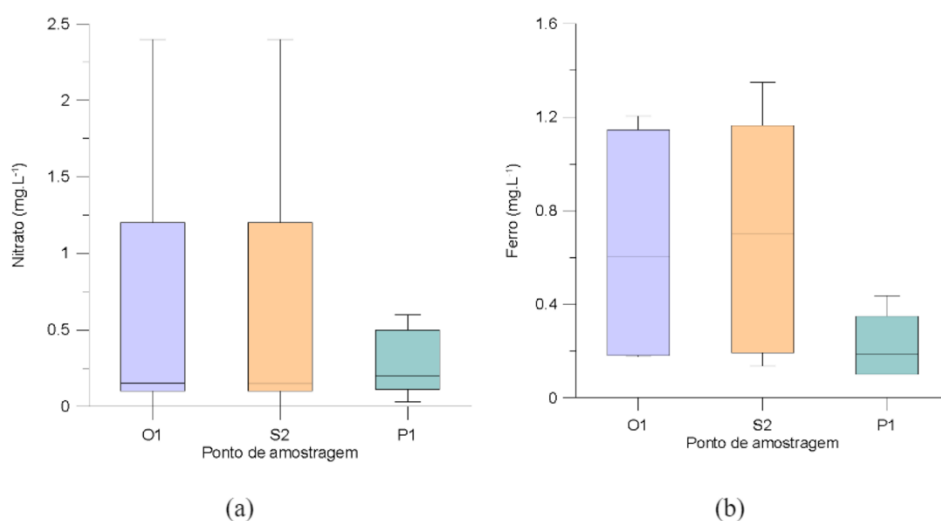


Figura 8. Concentração de compostos químicos na água dos pontos de coleta do rio São Francisco, de maio de 2015 a maio de 2020. (a) Nitrato; (b) Ferro. Fonte: Nascimento et al. (2023).

A concentração de nitrato na água esteve, durante todo o período de estudo, abaixo do limite

de potabilidade estabelecido pela Portaria 888/2021 do MS (Brasil, 2021) (10 mg.L^{-1}). Pode-

se concluir, então, que a ação antropogênica não é responsável por altos níveis de nitrato na água superficial, mas, possivelmente, ações naturais podem causar aumento nas concentrações do nitrato na água filtrada da FM com relação à água do rio.

Gupta et al. (2015) analisaram a água de um poço de FM às margens do rio Alaknanda, em Srinagar, na Índia. A água filtrada obteve concentrações de nitrato variando entre 53 e 138 mg.L⁻¹, enquanto a água do rio teve concentrações entre 0,3 e 4,2 mg.L⁻¹. Esse aumento de nitrato na água do poço com relação à água do rio deveu-se à geologia da região composta por rochas expostas que lixiviavam facilmente o nitrato para a água subterrânea e, conseqüentemente, para a água do poço.

Além da geologia, é comum condições redutoras na FM devido aos longos caminhos e grandes tempos de residências durante a passagem da água do manancial superficial ao poço (Gutiérrez, Halem & Rietveld, 2017). Em virtude dessas condições, em geral, a concentração de amônia do poço da FM tende a diminuir com relação ao reservatório superficial, enquanto as concentrações do nitrato e do nitrito tendem a aumentar.

Nagy-Kovács et al. (2019) avaliaram a concentração de nitrato na água do rio e no poço de FM às margens do rio Danúbio, na Hungria, em diferentes tempos de viagem. Para tempos de retenção de até 25 dias, não foi verificado efeito com relação à concentração do parâmetro entre a água do rio e do poço, mas, com tempos de viagem maiores que 50 dias, notou-se um aumento relevante na concentração do nitrato na água filtrada.

Portanto, embora apresente níveis baixos de nitrito na água superficial, o que é favorável ao uso da FM, é importante o estudo das características litológicas e de qualidade da água subterrânea da região antes da implantação do projeto de FM nas margens do rio São Francisco para que essas condições não aumentem a concentração do nitrato na água filtrada e o padrão de potabilidade seja ultrapassado.

Com relação aos metais no solo da região, Biondi et al. (2011) analisaram a presença de metais, como o Fe e o Mn, no solo de três regiões pernambucanas (Zona da Mata, Agreste e Sertão). Nas camadas superficiais e subsuperficiais, os autores detectaram uma concentração de 15,6 g.kg⁻¹ e 18,36 g.kg⁻¹ de Fe, respectivamente. Para o Mn, a média de 225,51 g.kg⁻¹ e 217,30 g.kg⁻¹ foi encontrada nas camadas superficiais e subsuperficiais, respectivamente. O estudo demonstrou que a concentração desses metais em

Pernambuco é baixa quando comparada com os demais estados brasileiros. Esse resultado demonstra que, durante a FM, o solo potencialmente não afetaria o aumento desses metais na água filtrada.

Porém, além de apresentar altos índices de Fe na água superficial, caso o rio também tenha baixos índices de OD, a tendência é que a água da FM apresente concentrações ainda maiores de Fe e Mn devido à solubilização dos metais causados em uma condição anaeróbica na passagem da água pelo solo (Boving et al., 2014; Romero-Esquivel et al., 2017; Maeng & Lee, 2019; Abdelrady et al., 2020).

Guedes et al. (2018) avaliaram as concentrações de Fe na água superficial e tratada pelo processo da FM em dois pontos distintos: Garanhuns-PE e Ituporanga-SC. Embora o solo de Ituporanga apresente concentrações de Fe mais elevadas que o solo de Garanhuns, os autores obtiveram níveis maiores do metal na água potável de Garanhuns devido às condições redutoras mais intensas que ocorrem durante a passagem da água pelos sedimentos do solo.

Conforme demonstra a Figura 5, a concentração de oxigênio na água do rio São Francisco é alta, com exceção do ponto S1. Dessa forma, possivelmente, a instalação de um sistema de FM às margens do rio São Francisco não apresentará problema com relação a estes metais, sobretudo na cidade de Petrolândia, onde o rio apresenta baixos níveis de ambos os metais.

Conclusão

O solo às margens do rio São Francisco na cidade de Santa Maria da Boa Vista-PE, além de ter uma espessura pequena, é muito argiloso, impossibilitando o uso da técnica da Filtração em Margem no município.

Para a cidade de Orocó, não foi possível determinar sua potencialidade quanto ao uso da Filtração em Margem devido ao solo com rochas intemperizadas, que impediu a investigação à percussão. Para estudos futuros, é válida a investigação com perfuratriz rotativa porque, embora seja uma técnica de investigação dispendiosa, a instalação de um poço de Filtração em Margem traria benefícios para a região, sobretudo quanto à economia com relação ao tratamento de água convencional utilizado na estação de tratamento de água do município.

A cidade de Petrolândia apresenta, previamente, características litológicas promissoras para o uso da Filtração em Margem porque pode apresentar uma camada espessa arenosa, mas, para a confirmação desse dado, é importante que seja realizada a investigação à

percussão no solo mais próximo às margens do rio. O contexto de ter o aquífero Jatobá atravessando a cidade e o rio deixa a situação promissora para a implantação da referida técnica.

Nos trechos estudados do semiárido pernambucano, o rio São Francisco apresenta qualidade da água em condições favoráveis ao uso da técnica da Filtração em Margem com relação a parâmetros físico-químicos (turbidez, cor, pH, condutividade elétrica, temperatura, nitrato, ferro e manganês), sobretudo na cidade de Petrolândia, onde a qualidade da água mostra-se superior aos demais municípios avaliados. Tendo então a técnica de FM como sistema simplificado e que garante um padrão de potabilidade contínuo e homogêneo, mesmo com os potenciais flutuações de qualidade no rio.

Um problema que pode ser encontrado na implantação da Filtração em Margem no município de Petrolândia é com relação à condutividade elétrica da água coletada no poço, pois a técnica não tem a capacidade de redução da concentração dos sais. Embora o rio São Francisco esteja inserido em uma região semiárida, a água superficial apresenta níveis baixos de condutividade elétrica, mas a água subterrânea apresentou índices de condutividade elétrica já superiores, o que pode resultar em água salinas na técnica da Filtração em Margem.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pela bolsa de pesquisa de Raquel Ferreira do Nascimento, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo financiamento de projeto de pesquisa (Proj CNPQ 421155/2018-3).

Referências

Abbasi-Moghadam, H. R.; Mahmoodlu, M. G.; Jandaghi, N.; Heshmatpour, A.; Seyed, M. 2021. River bank filtration for sustainable water supply on Gorganroud River, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1, 21-35. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09334-3>

Abdelrady, A.; Sharma, S.; Sefelnasr, A.; Kennedy, M. 2020. Characterisation of the impact of dissolved organic matter on iron, manganese, and arsenic mobilisation during bank filtration. *Journal Of Environmental Management*, 258, 110003-110012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110003>

Ahmed, A. K. A.; Marhaba, T. F. 2016. Review on river bank filtration as an in situ water treatment process. *Clean Technologies and*

Environmental Policy, 19, 2, 349-359. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1266-0>

APHA. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association. 541p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021. NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento: com SPT-Método de ensaio. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, BR. 17p.

Barbosa, P. S.; Carvalho, P. G. S.; Amorim M. C. C. 2023. Water quality in part of the Submiddle San Francisco region due to seasonality and land use and occupation. *International Journal of River Basin Management*, 21, 4, 617-624. <https://doi.org/10.1080/15715124.2022.2068560>

Biondi, C. M.; Nascimento, C. W. A.; Fabricio Neta, A. B.; Ribeiro, M. R. 2011. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Co em solos de referência de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 3, 1057-1066. <https://doi.org/10.1590/S0100-6832011000300039>

Boving, T. B; Choudri, B. S; Cady, P; Cording, A; Patil, K; Reddy V. 2014. Hydraulic and hydrogeochemical characteristics of a riverbank filtration site in rural India. *Water Environment Research*, 86, 7, 636-648. <https://doi.org/10.2175/106143013X13596524516428>

Brasil. Ministério da Saúde. 2021. Portaria Nº 888, de 04 de maio de 2021. 21p.

Brasil. Ministério do Desenvolvimento Regional. 2021. Resolução nº 150, de 13 de dezembro de 2021. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). 81p.

Cady, P; Boving, T. B; Choudri, B. S; Cording, A; Patil, K; Reddy, V. 2013. Attenuation of bacteria at a riverbank filtration site in rural India. *Water Environment Research*, 85, 11, 2164-2174. <https://doi.org/10.2175/106143013X13736496909428>

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2021. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php>. Acesso em: 04/05/2021.

D'alessio, M.; Dvorak, B.; Ray, C. 2018. Riverbank Filtration Impacts on Post Disinfection Water Quality in Small Systems-A Case Study from Auburn and Nebraska City, Nebraska. *Water*, 10, 12, 1865-1875. <https://doi.org/10.3390/w10121865>

- Dash, R. R.; Prakash, E. V. P. B.; Kumar, P.; Mehrotra, I.; Sandhu, C.; Grischek, T. 2010. River bank filtration in Haridwar, India: removal of turbidity, organics and bacteria. *Hydrogeology Journal*, 18, 4, 973-983. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0574-4>
- Dragon, K.; Górski, J.; Kruć, R.; Drożdżyński, D.; Grischek, T. 2018. Removal of natural organic matter and organic micropollutants during riverbank filtration in Krajkowo, Poland. *Water*, 10, 10, 1457. <https://doi.org/10.3390/w10101457>
- Freitas, D. A.; Cabral, J. J. S. P.; Rocha, F. J. S.; Paiva, A. L. R.; Sens, M. L.; Veras, T. B., 2017. *Cryptosporidium* spp. and *Giardia* spp. removal by bank filtration at Beberibe River, Brazil. *River Research and Applications*, 33, 7, 1079-1087. <https://doi.org/10.1002/rra.3151>
- FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. 2018. Manual de operação e manutenção de sistemas de tratamento de água por filtração em margem. Universidade Federal de Santa Catarina. 57p.
- Glorian, H.; Börnick, H.; Sandhu, C.; Grischek, T. 2018. Water Quality Monitoring in Northern India for an Evaluation of the Efficiency of Bank Filtration Sites. *Water*, 10, 12, 1804-1819. <https://doi.org/10.3390/w10121804>
- Grischek, T.; Schoenheinz, D.; Ray, C. 2002. Siting and Design Issues for Riverbank Filtration Schemes. In: Ray, C.; Melin, G.; Linsky, R. B. (ed.). *Riverbank Filtration: improving source-water quality*. Nova Iorque: Kluwer Academic Publishers, pp. 1-395.
- Guedes, T. L.; Michelan, D. C. G. S.; Santos, L. L.; Paiva, A. L. R.; Burgardt, T.; Cabral, J. J. S. P.; Dalsasso, R. L.; Sens, M. L. 2018. Occurrence of iron in bank filtration wells: case studies in Ituporanga (SC) and Garanhuns (PE). *Desalination and Water Treatment*, 101, 170-177. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.21764>
- Guedes, T. L.; Souza, F. H.; Ghisi, D. B.; Perez, A. B. A.; Dalsasso, R. L.; Sens, M. L. 2017. Aplicação da filtração em margem de rio como alternativa de tratamento de água para comunidades isoladas. *Revista DAE*, 67, 215, 84-94. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.007>
- Gupta, A.; Ronghang, M.; Kumar, P.; Mehrotra, I.; Kumar, S.; Grischek, T.; Sandhu, C.; Knoeller, K. 2015. Nitrate contamination of riverbank filtrate at Srinagar, Uttarakhand, India: a case of geogenic mineralization. *Journal of Hydrology*, 531, 626-637. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.065>
- Gutiérrez, J. P.; Van Halem, D.; Rietveld, L. 2017. Riverbank filtration for the treatment of highly turbid Colombian rivers. *Drinking Water Engineering and Science*, 10, 1, 13-26. <https://doi.org/10.5194/dwes-10-13-2017>
- Hiscock, K. M.; Grischek, T. 2002. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. *Journal of hydrology*, 266, 139-144. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00158-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00158-0)
- Machado, D. V.; Marques, E. D.; Viglio, E. P.; Santos, E. A. M.; Amarante, R. T.; Silva Júnior, G. C.; Silva-Filho, E. V. 2024. High-resolution mapping and multivariate technique (factor analysis) to support hydrogeochemical analysis and identification of surface water contamination. *Journal Of Geochemical Exploration*, 263, 107495. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107495>
- Maeng, S.; Lee, K. 2019. Riverbank Filtration for the Water Supply on the Nakdong River, South Korea. *Water*, 11, 1, 129-140. <https://doi.org/10.3390/w11010129>
- Murshed, M. F.; Kamaruzaman A.; Aziz, N. A. A.; Kamal, N H M. 2020. Influence of grain size distribution towards improvements of turbidity, colour and suspended particles in a riverbank filtration process - a column study. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, 920, 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/920/1/012006>
- Nagy-Kovács, Z.; Davidesz, J.; Czihat-Mártonné, K.; Till, G.; Fleit, E.; Grischek, T. 2019. Water Quality Changes during Riverbank Filtration in Budapest, Hungary. *Water*, 11, 2, 302-316. <https://doi.org/10.3390/w11020302>
- Noh, J.; So, S.; Park, J.; Kim, S.; Song, K.; Choi, J.; Kim, G.; Son, H.; Kim, H.; Maeng, S. 2022. An Assessment of the Effectiveness of Riverbank Filtration in a Sewage Plant Effluent-Impacted River Using a Full-Scale Horizontal Well. *Water*, 14, 12, 1873. <http://dx.doi.org/10.3390/w14121873>
- Paiva, A. L. R.; Cabral, J. J. S. P.; Demétrio, J. G. A.; Sobral, M. C. M. S. 2010. Filtração em margem para indução de recarga e melhoria da qualidade de água-estudo de caso: Rio Beberibe. *Águas Subterrâneas*, 24, 1, 103-114. <https://doi.org/10.14295/ras.v24i1.20094>
- Ray, C. 2002. *Riverbank Filtration: Understanding Contaminant Biogeochemistry and Pathogen Removal*. Tihany: Nato Science Series. 262p.
- Romero-Esquível, L. G; Grischek, T; Pizzolatti B. S; Mondardo, R. I; Sens, M. L. 2017. Bank

- filtration in a coastal lake in South Brazil: water quality, natural organic matter (NOM) and redox conditions study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 8, 2007-2020. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1382-5>
- Ronghang, M; Gupta, A; Mehrotra, I; Kumar, P; Patwal, P; Kumar, S; Grischek, T; Sandhu, C. 2018. Riverbank filtration: A case study of four sites in the hilly regions of Uttarakhand, India. *Sustainable Water Resources Management*, 5, 2, 831-845. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0255-3>
- Sahu, R. L.; Dash, R. R.; Pradhan, P. K.; Das, P. 2019. Effect of hydrogeological factors on removal of turbidity during river bank filtration: Laboratory and field studies. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100229. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100229>
- Sahu, R. L.; Dash, R. R.; Pradhan, P. K. 2022. Laboratory and Field Studies to Assess the Effect of Hydrogeological Parameters on Coliform Removal During Riverbank Filtration. *Journal of Hazardous, Toxic, And Radioactive Waste*, 26, 2. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000666](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000666)
- Santos, L. L; Cabral, J. J. S. P; Melo, R. T.; Molicca, R. J. R; Barros, T. H. S. 2011. Aplicação da Técnica de Filtração em Margens em um Reservatório Eutrofizado no Semi-Árido Nordeste. *Anais XIV World Water Congress. Congresso Internacional de Recursos Hídricos. Porto de Galinhas, PE, Brasil.* 19p.
- Shamsuddin, M. K. N.; Sulaiman, W. N. A.; Suratman, S.; Zakaria, M. P.; Samuding, K. 2014. Groundwater and surface-water utilisation using a bank infiltration technique in Malaysia. *Hydrogeology Journal*, 22, 3, 543-564. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-014-1122-4>
- Silva, Thyego R.; Lima, Mariucha M.C. 2023. Water quality assessment and hydrogeochemistry of a sedimentary basin in a semi-arid area under increasing exploitation: insights from multivariate statistical analyses, gis, and modeling. *Applied Geochemistry*, 150, 105593. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105593>
- Thakur, A. K.; Singh, V. P.; Ojha, C. S. P. 2012. Evaluation of a probabilistic approach to simulation of alkalinity and electrical conductivity at a river bank filtration site. *Hydrological Processes*, 26, 22, 3362-3368. <https://doi.org/10.1002/hyp.8248>
- UNESCO - The United Nations World Water Development Report. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>. Acesso em: 20/05/2018.
- Wahaab, R. A.; Salah, A.; Grischek, T. 2019. Water Quality Changes during the Initial Operating Phase of Riverbank Filtration Sites in Upper Egypt. *Water*, 11, 6, 1258-1275. <https://doi.org/10.3390/w11061258>