



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Tratamento para remoção de ferro das águas subterrâneas do município de Osório

Autor: Luca Zart Klafke

Orientador: Caroline Borges Agustini

Porto Alegre, abril de 2023

Autor: Luca Zart Klafke

Tratamento para remoção de ferro das águas subterrâneas do município de Osório

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientador: Caroline Borges Agustini

Banca Examinadora:

Profa. Lílíana Amaral Féris, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ma. Júlia Toffoli de Oliveira, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Ivan e Rosemaria, por todas as oportunidades que me proporcionaram, sempre batalhando pelo melhor para mim. E também, por acreditarem nos meus sonhos e fazerem deles os seus também. Nada seria possível sem o apoio de vocês!

À minha irmã, Natália, responsável por abrir algumas portas que eu seria incapaz de conseguir sozinho.

Ao meu namorado, Mateus, por ser fonte de amor e carinho, e mesmo à distância se mantém sempre presente.

Aos meus colegas e amigos que conheci na UFRGS, durante esses quase sete anos de graduação, em especial às Engenheiras Químicas Gabriela Fraga e Letícia Sfredo, que foram de suma importância para eu chegar até aqui. Obrigado por todo o apoio, ajuda e ensinamentos.

Ao Gustavo Bolzan, meu eterno doutorando, o qual me ensinou muito sobre pesquisa na minha época de IC do LAMOCA, mas muito mais sobre a vida.

À Carol pela oportunidade de tê-la como orientadora do meu Trabalho de Conclusão de Curso e também ao pessoal do LACOURO pela ajuda nos realização deste trabalho.

Agradeço à UFRGS e a todos os professores que tive a oportunidade de conhecer, com certeza, fizeram de mim não só um profissional com também uma pessoa melhor. Obrigado!

RESUMO

Águas subterrâneas podem apresentar elevadas concentrações de ferro dissolvido, que ao entrar em contato com o ar atmosférico oxida, formando precipitados insolúveis e indesejados. Estas águas usadas sem tratamento podem causar tanto manchas em instalações hidrossanitárias e em roupas lavadas com esta água quanto à saúde e ao bem estar de quem utiliza. O trabalho tem como objetivo a proposta de um tratamento de ozonização-filtração para uma água captada por poço tipo ponteira no município de Osório-RS, a qual tem concentrações do metal acima do valor máximo permitido pela Portaria da Consolidação nº 888/2021, do Ministério da Saúde, que estipula que o ferro em águas para consumo não ultrapasse concentrações de 0,3 mg/L. Foram realizados ensaios em laboratório para verificar a influência de três fatores controláveis sobre a redução de concentração estudados em dois níveis cada: tempo de contato (10 e 20 minutos), vazão de ozônio (2 g/h e 10 g/h) e meio filtrante (areia fina e grossa). Devido ao ponto de coleta ser geograficamente longe do local de análise e ensaio, necessitou-se a preservação da amostra, a qual se deu de duas maneiras, adição química e refrigeração. Realizou-se um planejamento fatorial do tipo 2^k , e os resultados comparados estatisticamente pela análise de variância. Pelo fato de o laboratório estar distante do ponto de coleta, optou-se por usar dois métodos de preservação diferentes nas amostras, a adição química e a refrigeração. A amostra preservada com ácido nítrico teve os resultados comprometidos, pois o pH muito baixo ocasionou a reação molecular do ozônio, a qual não oxidou o metal nos tempos propostos. Porém ao dar sequência ao tratamento, a mesma amostra ao passar pelo filtro de areia fina obteve uma redução na concentração de ferro, enquanto ao passar pela areia grossa não houve diminuição. Já a amostra refrigerada manteve suas características mais próximas às originais, para este tratamento optou-se por variar apenas dois fatores, tempo de contato e vazão, os quais se mostraram estatisticamente não influentes, e obteve-se redução superior a 96% da concentração do Ferro nos quatro experimentos realizados. Outras características da água como pH, turbidez, condutividade elétrica e matéria orgânica foram analisadas apenas para fins de comparação. Os resultados mostram que é possível reduzir a concentração do metal através do tratamento ozonização-filtração para valores entre 0,01 e 0,05 mg/L, os quais são inferiores ao máximo permitido pela legislação brasileira, 0,3 mg/L.

Palavras-chave: *água subterrânea, ozonização, filtração, remoção de ferro*

ABSTRACT

Groundwater may have high concentrations of dissolved iron, which, when in contact with atmospheric air, oxidize, forming insoluble and unwanted precipitates. These waters used without treatment can cause material damage due to the appearance of stains on the health and well-being of those who use it. The objective of this work is to propose an ozonation-filtration treatment for water captured by an artesian well in the city of Osório-RS, which has metal concentrations above the Maximum Value Allowed by Portaria da Consolidação nº 888/2021, of the Ministério da Saúde, which stipulates that Iron in drinking water does not exceed concentrations of 0.3 mg/L. The influence of three controllable factors on the concentration reduction studied at two levels each was verified: contact time (10 and 20 minutes), ozone flow (2 g/h and 10 g/h) and filter (fine and coarse sand). Due to the collection point being geographically far from the place of analysis and testing, it was necessary to preserve the sample, which took place in two ways, chemical addition and refrigeration. A 2^k factorial design was carried out, and the results statistically compared by analysis of variance. The preserved with nitric acid had compromised results, as the very low pH caused the molecular reaction of ozone, which did not oxidize the metal in standard times. However, when continuing the treatment, the same sample, when passing through the fine sand filter, obtained a reduction in the iron concentration, while when passing through the coarse sand, there was no reduction. The refrigerated sample kept its characteristics closer to the original ones, for this treatment it was decided to vary only two factors, contact time and flow rate, which statistically did not influence, and a reduction of more than 96% of the iron concentration was obtained in the four experiments carried out. Other water characteristics such as pH, turbidity, electrical conductivity and organic matter were left for comparison purposes only. The results show that it is possible to reduce the metal concentration through the ozonation-filtration treatment to values between 0.01 and 0.05 mg/L, which are lower than the maximum allowed by Brazilian legislation, 0.3 mg/L.

Keywords: *groundwater, ozonation, filtration, iron removal*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil esquemático de representação da ocorrência dos três sistemas aquíferos	3
Figura 2: Esquema de um poço artesiano	4
Figura 3: Matéria orgânica do solo nos diferentes processos que interferem a dinâmica.....	6
Figura 5: Mapa Hidrogeológico da área de estudo	14
Figura 6: Poço do tipo Ponteira	15
Figura 7: Montagem do experimento	17
Figura 8: Coluna de filtração.....	17
Figura 9: Curva de calibração de concentração de Ferro.....	20
Figura 10: Valores da redução de Ferro após os tratamentos de ozonização e filtração.....	22
Figura 11: Amostras II após ozonização	24
Figura 12: Filtro de areia com retenção de precipitado.....	24
Figura 13: Comparação entre a Água bruta e as tratadas.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição de técnicas de preservação	9
Tabela 2: Agentes Oxidantes e respectivos potenciais de oxidação	11
Tabela 3: Classificação dos filtros	13
Tabela 4: Fatores e níveis do Experimento I	15
Tabela 5: Fatores e níveis do Experimento II	16
Tabela 6: Análise Granulométrica da areia comercial grossa	19
Tabela 7: Análise Granulométrica da areia comercial fina	20
Tabela 8: Análise de Carbono Orgânico Total	21
Tabela 9: Concentração de Ferro nas amostras após tratamento ozonização/filtração	22
Tabela 10: Anova I	23
Tabela 11: Concentração de Ferro nas amostras após tratamento	25
Tabela 12: Anova Experimento II	25
Tabela 13: Parâmetro de qualidade das amostras II	26

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	Água Subterrânea	2
2.1.1	Aquífero Quaternário Costeiro	2
2.1.2	Qualidade da Água Subterrânea	4
2.1.3	Ocorrência de Ferro	5
2.2	Características da Água	5
2.2.1	Matéria Orgânica	5
2.2.1.1	Complexação com Metais	6
2.2.2	Turbidez	7
2.2.3	pH	7
2.2.4	Condutividade Elétrica	7
2.3	Coleta, preservação e análise de amostra	8
2.4	Tratamentos	9
2.4.1	Aeração	10
2.4.2	Cloração	10
2.4.3	Ozônio	10
2.4.4	Filtração	12
3	Materiais e Métodos	14
3.1	Coleta	14
3.2	Planejamento Experimental	15
3.3	Aparato Experimental	16
3.3.1	Meio filtrante	17
3.3.2	Espectofotometria	18
3.4	Caracterização Físico-químicas	18
3.5	Análise dos resultados	18
4	Resultados e Discussões	19
4.1	Caracterização da Areia	19
4.2	Determinação da Curva de Calibração	20
4.3	Determinação da Matéria Orgânica	21
4.4	Experimento I - Ajuste de pH	21
4.5	Experimento II – Refrigeração	23
4.6	Discussão dos resultados	26
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	28
	REFERÊNCIAS	29

1 Introdução

A água é um dos recursos naturais mais importantes em nosso planeta sendo fundamental para a existência e sobrevivência de todas as espécies, mesmo assim, ela não é distribuída de forma igual e suficiente, com fortes variações ao longo do ano que podem torná-la um bem precioso e escasso em algumas regiões.

A ausência de uma rede de abastecimento hídrico, em algumas localidades, impõe aos moradores a busca por alternativas para suprir a carência em razão da falta de abastecimento público. Uma das alternativas mais eficientes, para a região costeira do Rio Grande do Sul, que permite solucionar tal problema de forma rápida e menos onerosa, é a perfuração de poços do tipo ponteira que possibilita a captação de águas em profundidades de perfuração de aproximadamente 20 metros (REGINATO; MICHALSKI; PAIM, 2017).

Entre os parâmetros importantes para a potabilidade da água está a concentração de ferro. É comum águas subterrâneas possuírem teores naturais de ferro acima dos padrões de potabilidade em decorrência da origem do sedimento a que estão associadas. Sabe-se que o consumo de água com excesso de ferro pode causar danos à saúde e ao bem-estar humano, além de que seu uso provoca manchas em roupas e aparelhos sanitários (MELO; COSTA; AQUINO, 2008).

Há vários tratamentos que são estudados visando a redução do metal, seja de forma biológica, física, química ou físico-química. Em tratamento físico-químicos, vários compostos podem ser utilizados para desencadear reações de oxirredução com formas solúveis de Ferro, sendo que os mais empregados são produtos à base de cloro, oxigênio molecular, peróxido de hidrogênio, permanganato de potássio e ozônio (DI BERNARDO; DANTAS, 2006).

Em relação às outras alternativas, a ozonização oferece a vantagem de ser um sistema de oxidação e desinfecção mais rápido e forte que os demais. O ozônio pode ser facilmente obtido a partir de equipamentos concentradores de oxigênio ou de ar comprimido, não possibilitando a formação de compostos organoclorados e, além disso, o ferro contribui para a remoção de matéria orgânica sem causar depleções significativas no oxigênio dissolvido no meio, pois alguns de seus subprodutos de reação podem ser oxigênio e água (MORUZZI; REALI, 2012).

Contudo, ao promover a transformação das espécies iônicas e solúveis para formas precipitáveis, que continuam presentes no meio líquido, é necessário que haja uma etapa posterior específica para a retirada desses constituintes da água. Como a filtração com materiais permite a remoção de contaminantes suspensos e dissolvidos, essa se apresenta como opção de pós-tratamento que deve ser avaliada.

Sendo assim, estudos sobre o emprego de ozônio seguido da filtração para a descontaminação de águas com elevadas concentrações de ferro, comparando-se diferentes materiais filtrantes, tornam-se de suma importância para o desenvolvimento de um melhor entendimento sobre o funcionamento dessa técnica e, conseqüentemente, poder auxiliar a melhor tecnologia de tratamento possível a fim de remediar esse problema.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Água Subterrânea

Estima-se que mais de 97% do volume total de água da Terra é salgada, sendo responsável pela formação de oceanos e mares, ou seja, impossibilitando o seu consumo sem uma etapa de tratamento. Embora já existam tecnologias para a dessalinização, o custo ainda é muito elevado. Do restante de água do planeta (3%), aproximadamente 69% compõe as calotas polares e as neves que cobrem os cumes das montanhas, 29,9% constituem as águas subterrâneas, 0,9% representam a umidade do solo e 0,3% são a água doce de rios e lagos (REBOUÇAS, 2008).

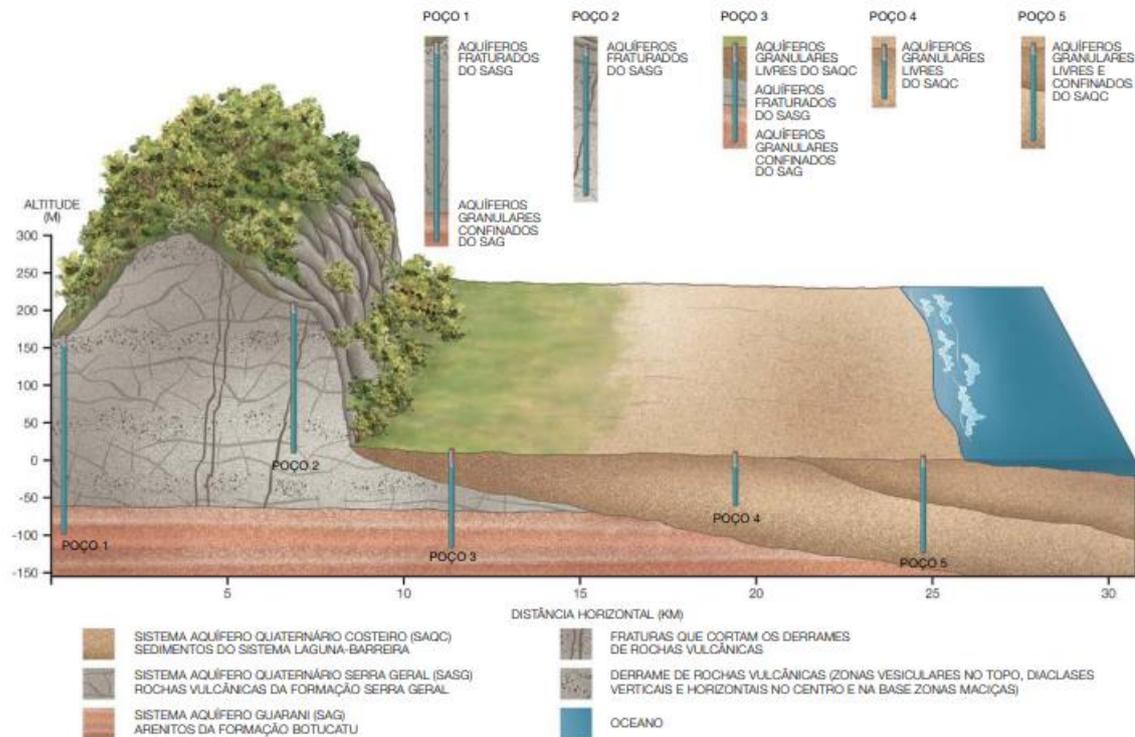
A água subterrânea é um recurso muito importante e essencial para o ciclo da água. Utilizada desde a antiguidade para abastecimento da população e irrigação, seu consumo e exploração aumentou com o avanço da tecnologia, possibilitando perfurações de poços mais profundos e uso de bombas hidráulicas (HERRÁIZ, 2009). Segundo a Resolução Nº 396/2008 do CONAMA (2008), as águas subterrâneas são definidas como aquelas que ocorrem de forma natural ou artificialmente no subsolo. A passagem superficial para o interior do solo se dá principalmente através da infiltração, o qual está relacionado com a disponibilidade da água, natureza do solo, estado de superfície e quantidades de água e ar presente no seu interior.

A mesma pode ser dividida em duas zonas: aeração e saturação. A primeira está entre a superfície do terreno e a linha de saturação, seus poros contêm água e ar. A zona de saturação inicia-se na linha de saturação e estende-se até uma barreira impermeável e seu interior está completamente ocupado por água. O limite entre essas zonas é conhecido como lençol freático e os espaços entre as rochas saturadas que permitem a circulação, armazenamento e extração da água são chamados de aquíferos (ECKHARDT *et al.*, 2009).

2.1.1 Aquífero Quaternário Costeiro

Na região do município de Osório há três grandes sistemas aquíferos: o (i) Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), o (ii) Sistema Aquífero Guarani (SAG) e o (iii) Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC). O SASG apresenta uma baixa vazão e uma água de boa qualidade contendo poucos sais, entretanto, devido à sua pequena extensão, é mais vulnerável a contaminações. Na região litorânea do Rio Grande do Sul, esse aquífero está localizado acima do SAG, conforme ilustrado na Figura 1, que por sua vez, apresentam boa capacidade de produção e águas de boa qualidade (REGINATO; MICHALSKI; PAIM, 2017).

Figura 1: Perfil esquemático de representação da ocorrência dos três sistemas aquíferos

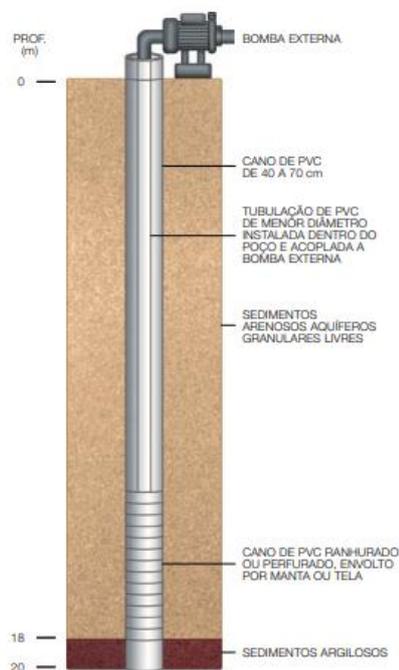


Fonte: Reginato et al. (2017).

O Sistema Aquífero Quaternário Costeiro é o principal recurso hídrico subterrâneo do município de Osório, podendo ser dividido em SAQC I e SAQC II. Esses aquíferos estão localizados em sedimentos arenosos, sendo granulares livres em areais menos profundas de até 25 metros, e confinados quando estão entre 25 e 75 m de profundidade (REGINATO; MICHALSKI; PAIM, 2017). O SAQC I possui uma alta capacidade de produção, porém é extremamente vulnerável à contaminação nas porções mais superficiais devido, principalmente, aos altos valores de porosidade, permeabilidade e vazão nos poços. O SAQC II apresenta uma menor vazão e maiores concentrações de sais (MACHADO; FREITAS, 2005).

A captação de água na região é comumente feita através de poços do tipo ponteira, conforme ilustrado na Figura 2, também conhecidos, popularmente, como poços artesanais. São construídos a partir de PVC, com diâmetro de 40 a 75 mm e são perfurados a partir de sondas que utilizam jato d'água e instalados em profundidades de até 30 metros. São usados para captar água de aquíferos granulares (principalmente livres e que estão localizados em camadas de areia fina). Eles possuem baixas profundidades (a maior parte inferior a 20 metros) e vazões (a maioria inferior a 2 m³/h). A água captada por esses poços é utilizada principalmente para consumo humano (REGINATO et al., 2017).

Figura 2: Esquema de um poço artesiano



Fonte: Reginato et al. (2017).

2.1.2 Qualidade da Água Subterrânea

A qualidade da água subterrânea é definida pela sua composição e pelo conhecimento dos efeitos que podem causar os seus constituintes para cada finalidade de seu uso, como consumo humano, dessedentação animal, irrigação e industrial (SANTOS, 2008). Há diversos processos e fatores que influenciam na qualidade dessas águas, sendo intrínsecos e extrínsecos ao aquífero. À medida que a água se move dentro do aquífero, a concentração de substâncias dissolvidas tende a aumentar. Além disso, há fatores como clima, composição da nova água que infiltra o solo, tempo de contato entre a água e o meio físico, além de alterações causadas pelo homem no ambiente. Os aquíferos livres pouco profundos são os mais vulneráveis à contaminação (REGINATO; MICHALSKI; PAIM, 2017; SANTOS, 2008).

Segundo Reginato et al. (2017) os principais problemas da qualidade de água no município de Osório têm origem natural. O ferro está dissolvido nas águas subterrâneas, mas comumente, quando entra em contato com o ar, ele precipita, ocasionando alterações na cor da água. Se a mesma possui uma concentração de ferro dissolvido superior a 0,3 mg/L, irá apresentar problemas de potabilidade, impossibilitando seu consumo sem tratamento. Os dados das análises químicas realizadas em amostras de água coletadas nos poços de Osório permitiram identificar que o ferro pode ocorrer em todos os sistemas aquíferos. No entanto, as águas subterrâneas do SAQC são as que apresentam a maior quantidade de poços com concentrações de ferro acima de 0,3 mg/L, os quais estão associados a sedimentos de origem lagunar.

Outros parâmetros levantados nos estudos de Reginato et al. (2017) no município de Osório foram cor e turbidez. Parâmetros os quais relacionam à presença de substâncias dissolvidas na água (por exemplo, ferro), partículas finas e matéria orgânica presentes nas camadas de sedimentos que formam os aquíferos. Na região, foi observado que alguns

poços do tipo ponteira que captam água de aquíferos granulares do SAQC apresentam problemas de coloração e turbidez, tornando a água imprópria para consumo. Há ainda outros problemas que afetam a qualidade das águas, como a ocorrência de águas salobras e águas duras. As águas salobras têm diferentes origens, sendo uma delas a zona de mistura entre a água dos aquíferos e a do mar. A elevada dureza, gerada em função da presença, principalmente, de carbonatos que podem precipitar, ocasionando a formação de crostas de coloração esbranquiçada, caracterizam as águas duras. Em geral, quando esta água é fervida há precipitação de carbonato no fundo do recipiente. Essa precipitação pode ocorrer também em chuveiros e tubulações, provocando incrustação.

2.1.3 Ocorrência de Ferro

O ferro é um parâmetro químico inorgânico, conferindo à água uma coloração amarelada e turva, sabor amargo e adstringente. Nas águas naturais, o ferro é encontrado principalmente sob as formas de bicarbonato ferroso ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$), hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) e sulfato ferroso (FeSO_4). O ferro sob a forma de bicarbonatos e sulfatos produzem por dissociação os íons ferrosos, enquanto que o ferro sob a forma de hidróxido apresenta-se em suspensão coloidal. Em águas subterrâneas, de pH baixo, ricas em gás carbônico e sem oxigênio dissolvido, a principal forma de ferro encontrada é de bicarbonato ferroso dissolvido. Dessa forma, este composto acarreta diversos problemas ao abastecimento público da água, além de alterar a cor e o sabor da mesma, provoca manchas em roupas e aparelhos sanitários e surgimento de ferrobactérias (CARDOSO, 2019; MELO; COSTA; AQUINO, 2008).

A Resolução CONAMA nº 396/2008 estabelece que os limites adequados para este parâmetro são: 0,3 mg/L para águas destinadas ao consumo humano e à recreação e de 5 mg/L para a irrigação. Conforme a Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde, o valor máximo permitido é de 0,3 mg/L de ferro (BRASIL, 2021).

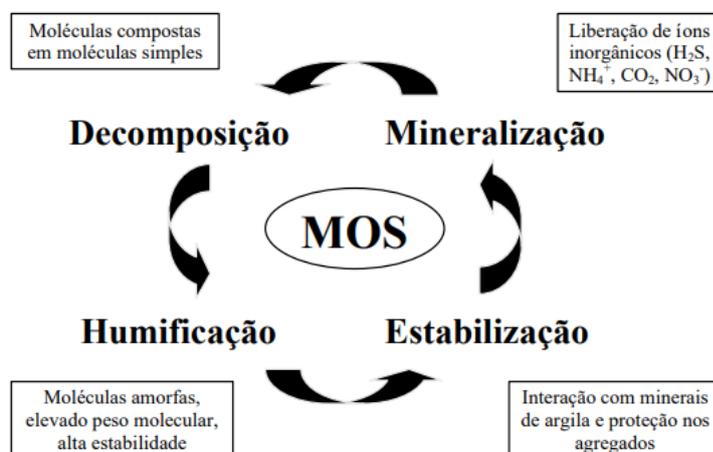
2.2 Características da Água

As características qualitativas podem ser identificadas por parâmetros físicos, abrangidos pelas análises de cor, turbidez, temperatura, sabor e odor; químicos, que compreendem as análises de matéria orgânica, e, parâmetros microbiológicos, os quais indicam presença ou ausência de microrganismos potencialmente patogênicos (SPERLING, 2011).

2.2.1 Matéria Orgânica

A formação de matéria orgânica do solo (MOS) deve-se, principalmente, pelos resíduos orgânicos, geralmente, restos de animais, plantas e bactérias; os quais estão submetidos a contínuas transformações sob ação dos fatores: físicos, químicos, biológicos, climáticos e do uso e manejo da terra. Os fatores de formação possuem estreita relação com processos importantes na dinâmica, em destaque para: decomposição, mineralização, humificação e estabilização, conforme ilustrado na Figura 3 (FONTANA, 2009; SILVA, 2013).

Figura 3: Matéria orgânica do solo nos diferentes processos que interferem a dinâmica



Fonte: Fontana (2006).

O processo de humificação é um dos mais importantes processos biogeoquímicos do planeta, já que garante a estabilidade do ciclo global de energia e materiais. Neste processo, a totalidade dos carbonos orgânicos “mortos” são transformados em substâncias húmicas, através dos processos degradativos, de polimerização e de condensação, e são esses compostos que estão presentes como matéria orgânica na água (SILVA, 2013).

As transformações que a matéria orgânica sofre origina um material que pode ser dividido em dois grupos: as substâncias não húmicas e as substâncias húmicas (SH); considerando a solubilidade em meio aquoso estas substâncias são classificadas usualmente em ácidos fúlvicos, humina e ácidos húmicos. Os ácidos fúlvicos são solúveis em qualquer faixa de pH; os ácidos húmicos são solúveis em meio alcalino e insolúvel em meio ácido ($pH < 2$); a humina é a fração insolúvel em qualquer intervalo de pH (SANTOS, 2016).

2.2.1.1 Complexação com Metais

Em condições naturais, as substâncias húmicas consistem em uma complexa mistura de substâncias que apresentam baixo peso molecular e diferentes grupos funcionais. Esses grupos funcionais, carboxila e hidroxila fenólica, que são ricos em oxigênio, conferem as substâncias húmicas habilidades de formarem complexos estáveis com íons metálicos devido a sua afinidade por estes grupos (HUELVA LÓPEZ *et al.*, 2013). Esta afinidade das substâncias húmicas com os íons metálicos é capaz de gerar sítios de adsorção que atuarão como quelantes na solução do solo e/ou via solução iônica (troca de elétrons). A quelação poderá favorecer o transporte do metal, mantê-lo em solução ou torná-lo indisponível pela precipitação e envelhecimento do complexo formado (SANTOS, 2016)

Considerando a adsorção ou complexação de metais por substâncias húmicas, existem dois aspectos que são de plena importância: i) a interação do metal-ligante ocorre por meio de reações de sorção entre o metal e os ácidos orgânicos com baixo peso molecular, sendo este, resultado de uma íntima associação ao nível molecular entre o metal e um ligante ou entre o metal e um ou mais grupos funcionais das substâncias húmicas; ii) a estabilidade constante dos complexos formados que ao relacionar as substâncias húmicas com os metais,

permite o entendimento da afinidade entre ambos bem como uma percepção sobre o destino final do metal no ambiente (JEONG; YOUNG; MARSHALL, 2007)

A relação das substâncias húmicas e os íons metálicos dependem de variadas características como: massa molecular, tamanho molecular, estrutura e características de solubilidade e das condições de pH (SANTOS, 2016). Dentre estas, o pH é considerado um dos fatores que mais afetam a mobilidade, distribuição química e disponibilidade dos íons metálicos no solo, pois o aumento no pH resulta no aumento da capacidade de troca catiônica devido a desprotonação dos grupamentos ácidos das substâncias húmicas e da superfície dos óxidos, na formação de hidróxidos, carbonatos e fosfatos insolúveis com os íons metálicos. Além disso, o ferro apresenta duas características muito importantes, as quais são: a alta afinidade para formar complexos com vários ligantes, como ácidos orgânicos e fosfatos, e a capacidade em alterar sua valência sendo estas características a base de numerosos efeitos fisiológicos desse nutriente (MOTHÉ, 2012).

2.2.2 Turbidez

A turbidez é definida como a dificuldade da água para transmitir a luz devido à presença de partículas em suspensão. A presença dessas partículas provoca a dispersão e absorção da luz, dando uma aparência nebulosa ao fluido, esteticamente indesejada e potencialmente perigosa (ALMEIDA; SILVA; PAULA, 2017). A turbidez de origem natural é ocasionada por partículas de silte e argila, além de algas e outros microrganismos. A turbidez de origem antrópica é provocada por microrganismos, erosão, lançamentos domésticos e industriais (SPERLING, 2011).

Conforme a Resolução CONAMA 396, no Art. 13, é definida que a turbidez é determinada como um dos parâmetros necessários para acompanhamento da qualidade da água subterrânea. Ela não possui valor máximo determinado permitido de Unidade de Turbidez (uT), (BRASIL, 2008), que se difere da Portaria de Consolidação nº 888 de 2021, que determina a quantidade máxima de 5 uT (BRASIL, 2021).

2.2.3 pH

O potencial hidrogeniônico (pH) é a medida da concentração hidrogeniônica e expressa os meios ácidos, $\text{pH} < 7$; alcalinos, $\text{pH} > 7$. As águas naturais geralmente apresentam pH próximos a 7 - pH neutro (CARDOSO, 2019). Para a resolução CONAMA 396/2008, que dita sobre a classificação e diretrizes do enquadramento das águas subterrâneas o pH não é determinado. Todavia, na Portaria de Consolidação nº 888/2021, o pH recomendado é entre 6 e 9, independente da temperatura da água (BRASIL, 2021).

2.2.4 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica (CE) mede a facilidade da água em conduzir corrente elétrica e está ligada à quantidade de sais nela dissolvidos. É um parâmetro que aumenta com a elevação da temperatura e, de forma geral, deve ser medido em campo com o auxílio de condutímetro portáteis (SANTOS, 2008). A CE está relacionada à concentração de partículas carregadas na água e depende principalmente de ânions e cátions presentes na mesma. Os principais cátions (+) nas águas subterrâneas são: sódio, cálcio, potássio,

magnésio; enquanto os principais ânions (-) são: cloreto, sulfato, carbonato e bicarbonato (CARDOSO, 2019).

Na Resolução CONAMA 396 de 2008 e na Portaria de Consolidação nº 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021), o parâmetro não é quantificado, porém é indispensável para uma proposta de enquadramento das águas subterrâneas conforme Art. 13 da mesma Resolução (BRASIL, 2008).

2.3 Coleta, preservação e análise de amostra

A coleta de amostras tem papel fundamental na obtenção de resultados confiáveis e representativos. Portanto, deve ser realizada seguindo técnicas de amostragem e preservação e medidas de segurança (ABNT, 1967). As amostras de água podem ser de dois tipos: simples, quando é retirada uma porção diretamente do ponto selecionado, e composta, característica de uma mistura de várias coletas simples que podem ser de diferentes locais ou do mesmo em tempos diferentes. Recomenda-se, um volume mínimo de 500 ml para a análise de metais pesados (PIRES; GOMES; SOUZA, 2006).

Há análises que devem ser realizadas durante a coleta como: pH e temperatura. As determinações de campo devem ser realizadas em recipientes separados daqueles que serão enviados ao laboratório, evitando-se assim possíveis contaminações. Para a determinação do pH, quando possível, deve ser usado um pHmetro portátil, caso isso não seja possível poderá ser utilizado tiras de pH de boa qualidade. (PIRES; GOMES; SOUZA, 2006)

Independente da natureza da amostra, a estabilidade completa é muito difícil ser mantida. Por isso, há algumas técnicas de preservação com o objetivo de retardar a ação biológica e a alteração dos compostos químicos, reduzir a volatilidade ou precipitação dos constituintes e os efeitos de adsorção. As alterações químicas que podem ocorrer são, principalmente, em função das condições físico-químicas da amostra, como os metais precipitarem como hidróxidos ou formar complexos com outros constituintes, os cátions e ânions podem mudar o estado de oxidação, íons podem ser adsorvidos na superfície interna do frasco de coleta, e outros constituintes podem dissolver-se ou volatilizar-se com o tempo. As ações biológicas podem conduzir à alteração da valência de elementos ou radicais. Os constituintes solúveis podem ser convertidos em matéria orgânica e, com a ruptura das células, esses constituintes podem ser liberados na solução (BRANDÃO *et al.*, 2011).

As técnicas de preservação de amostras mais empregadas são: adição química, congelamento e refrigeração, descritas na Tabela 1. Para a realização das análises de Condutividade Elétrica e Turbidez, a preservação deve ser feita por resfriamento em gelo, enquanto para análise de metais recomenda-se a adição de ácido nítrico (HNO₃) até pH < 2 ou refrigeração.

Tabela 1: Descrição de técnicas de preservação

Técnica de Preservação	Descrição
Congelamento	Aplicado para aumentar o intervalo de tempo entre a coleta e a análise, para maior parte dos parâmetros de composição química. Não pode ser usado para a determinação de DBO e DQO, bem como do teor de sólidos filtráveis e não filtráveis.
Refrigeração	Técnica comum em trabalhos de campo de amostras para ensaios microbiológicos, físico-químicos orgânicos e inorgânicos, biológicos e toxicológicos. As amostras são mantidas entre 1°C e 4°C preservando a maioria de características físicas, químicas e biológicas em curto prazo (< 24 horas).
Adição química	Método mais conveniente, através do qual o reagente é adicionado imediatamente após a tomada da amostra, promovendo a estabilização dos constituintes de interesse por um período maior. A adição de ácidos minerais evita a precipitação de hidróxidos metálicos de baixa solubilidade, o que poderia subestimar a análise, devido à formação de precipitados (fase sólida), onde se encontrariam uma parte dos metais.

Fonte: Guia Nacional de coleta e preservação de amostras (2011).

2.4 Tratamentos

Existem muitos processos para a remoção de ferro, embora a oxidação em pH apropriado com aeração ou o uso de oxidantes químicos sejam os mais utilizados em saneamento ambiental (MORUZZI; REALI, 2012). Os métodos usualmente empregados para controle ou remoção de ferro da água de abastecimento são:

- Formação de precipitado e filtração;
- Troca iônica;
- Complexação com orto-polifosfato e hexametáfosfato de sódio.

A formação de precipitados, seja por aeração ou por oxidação, seguida de filtração é a tecnologia mais empregada. A troca iônica é recomendável somente quando a concentração de ferro é muito baixa, geralmente menor que 0,5 mg/L. Enquanto o orto-polifosfato também é um dos complexantes de metais de transição com potencial para ser aplicado também em redes de distribuição de água, pois promove a inibição da corrosão, limpeza e blindagem de tubulações, entretanto não remove o complexado que permanece na água (RAMOS *et al.*, 2020).

2.4.1 Aeração

No início do século passado, a aeração foi um processo muito valorizado pelos projetistas e era muito presente nas estações de tratamento. Ela traz muitos benefícios, pois, além da oxidação dos metais, ela também auxilia na remoção de outras substâncias, como os voláteis. O processo consiste na transferência de substâncias da água para o ar, e do ar para a água, que ocorre na região da interface ar-água. O sentido da transferência é sempre aquele que tende a conseguir o valor de saturação e a velocidade depende da rapidez com que novas superfícies são formadas e expostas. Normalmente, são atingidos resultados satisfatórios com valores de pH maiores que 7,0 mas recomendado somente para águas com altas concentrações de ferro ($> 5\text{mg/L}$), amenizando os custos com produtos químicos (MORUZZI; REALI, 2012).

2.4.2 Cloração

Muitas vezes o Cloro tem como principal ou até mesmo único objetivo no tratamento de água a desinfecção, entretanto, pode ser utilizado como agente oxidante para a remoção do Ferro (FILHO; SAKAGUTI, 2008). O tratamento de metais solúveis por cloração é um processo simples, que normalmente requer pequenas unidades de cloro e pode ser executado utilizando tanto o composto gasoso como em sua forma de hipoclorito. Além disso, os filtros utilizados neste processo são similares aos utilizados no processo de aeração-filtração (MORUZZI; REALI, 2012).

Apesar da facilidade de aplicação e elevado grau de utilização no Brasil, a reação entre substâncias químicas utilizadas no tratamento oxidativo com cloro livre e matéria orgânica, tais como os ácidos húmicos e fúlvicos, pode resultar na geração de subprodutos, os quais podem ser considerados como poluentes ambientais, e muitos, cancerígenos; entre os quais encontram-se os trihalometanos, ácidos haloacéticos, haloaldeídos, halocetonas, halofenóis e halopicrinas (PASCHOALATO; TRIMAILOVAS; DI BERNARDO, 2008).

Outras desvantagens que podem ser destacadas é que o Cloro é corrosivo e perigoso para os seres vivos, o que exige que seu manejo seja feito de forma cuidadosa. Além de poder provocar problemas de gosto e odor, especialmente na presença de fenóis (EMBOABA, 2019).

2.4.3 Ozônio

O ozônio (O_3) é um forte oxidante e um poderoso desinfetante. Além de auxiliar na remoção de turbidez e cor, o ozônio tem sido usado em tratamentos de água desde o início do século XX, mas somente nas últimas décadas que estão sendo criadas plantas designadas para tratamento de água potável. O ozônio é um gás molecular instável, conhecido como forma alotrópica do elemento químico oxigênio, formado naturalmente pela fotólise de moléculas de gás oxigênio na Estratosfera (RAKNESS, 2005).

A ozonização é muito eficiente para redução de teor de ferro, desintegração de compostos fenólicos e alguns pesticidas. A sua atividade biocida não é influenciada pelo pH e também gera uma diminuição da dosagem de cloro na pós-cloração. De uma forma geral, o tratamento melhora a qualidade da água nas diferentes estações de tratamento, embora

tenha um custo mais elevado de instalação e geração, e o cuidado redobrado por ser um produto altamente tóxico e corrosivo (DI BERNARDO; DANTAS, 2006).

Conforme é mostrado na Tabela 2, o ozônio possui um alto potencial de oxidação, sendo assim, um poderoso oxidante cuja desinfecção é mais eficiente e mais rápida quando comparado com o Cloro. O ferro é oxidado em valores de pH compreendido entre 6 e 9.

Tabela 2: Agentes Oxidantes e respectivos potenciais de oxidação

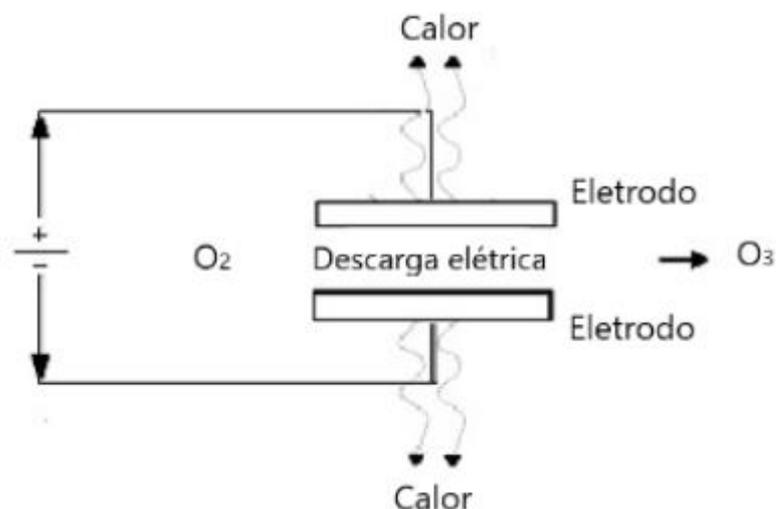
Agente oxidante	Potencial de oxidação (mV)
F ₂	3,06
O ₃	2,07
HOCl	1,49
Cl ₂	1,36

Fonte: Silva et al. (2011).

Existem muitos modos de se produzir ozônio para fins de tratamento de água, como é o caso das técnicas fotoquímica, eletrolítica e radioquímica de geração. Porém, o sistema mais comumente utilizado é o da descarga corona, representado na .

Figura 4, o qual consiste em um aparato composto por dois eletrodos submetidos a uma elevada diferença de potencial, o qual cria uma descarga elétrica que, ao atravessar uma corrente de ar seco, divide algumas moléculas do oxigênio diatômico. Assim, o oxigênio livre, resultante da quebra provocada pela descarga elétrica, passa a reagir com moléculas de O₂, originando as moléculas de O₃ (EMBOABA, 2019).

Figura 4: Sistema para a produção de Ozônio



Fonte: Silva et al. (2011).

Em solução aquosa, o ozônio pode reagir com os compostos orgânicos através de reações diretas, as quais envolvem o ozônio molecular ou através de reações indiretas que envolvem reações com os radicais hidroxila (OH^\cdot) característicos de processos oxidativos avançados (POAs), os quais são formados da decomposição do ozônio. A oxidação direta de compostos pelo ozônio se caracteriza por ser uma reação seletiva e lenta, enquanto que a reação indireta é altamente reativa e pouco seletiva. Durante o tratamento de água, esses dois mecanismos podem ocorrer simultaneamente, variando de acordo com a qualidade do manancial (sua composição inicial) e a presença de espécies iniciadoras, inibidoras e/ou promotoras participantes do processo de reação em cadeia. A desinfecção ocorre por reação direta, enquanto a oxidação ocorre pelas duas vias. Em pH mais baixo, predomina a oxidação direta, enquanto que um valor de pH mais elevado propicia a produção de radicais hidroxila, favorecendo a ação de processo oxidativo avançado (SILVA *et al.*, 2011).

2.4.4 Filtração

A filtração é um processo de separação sólido-líquido, que tem como finalidade a remoção de partículas em suspensão e coloidais e microrganismos em geral, que não foram retidos nas etapas anteriores, de forma a garantir uma desinfecção efetiva. A eliminação dos sólidos nos filtros está baseada no princípio de ação mecânica que um meio poroso pode reter impurezas de dimensões menores que as dos poros da camada filtrante. As partículas vão sendo retidas nos poros do meio filtrante, proporcionando seu acúmulo e aumentando a perda de carga. Conforme for acontecendo o processo de filtração, os vazios vão sendo obstruídos pelas partículas, reduzindo o diâmetro dos poros e passando a reter partículas de diâmetros cada vez menores, o que aumenta a eficiência de remoção de sólidos no sistema (TONETTI *et al.*, 2004).

Conforme Di Bernardo (2006), o processo de retenção de sólidos suspensos no meio poroso ocorre por meio de três ações distintas:

- Peneiramento: fenômeno superficial que vai reter partículas de tamanho superior aos poros.
- Sedimentação: a passagem da água pelos poros permite que cada espaço poroso funcione como um pequeno decantador, favorecido pela redução da velocidade da água.
- Adesão e coesão: o contato entre uma partícula em suspensão com o grão do material filtrante ou sedimentos cria forças de atração elétrica, o que explica como os filtros retêm partículas muito menores que o tamanho dos poros.

Um dos materiais mais utilizados como meio filtrante é a areia. Para a seleção correta da areia devem ser utilizados dois parâmetros: diâmetro efetivo médio das partículas e o coeficiente de uniformidade. O filtro de areia apresenta um desempenho superior em reter material orgânico quando comparado com outros tipos de filtros devido a sua capacidade de coletar esses contaminantes ao longo da trajetória percorrida na camada filtrante. A eficiência de filtração dos filtros de areia é medida de acordo com sua capacidade de remover partículas de um determinado tamanho. Essa eficiência aumenta com a redução da granulometria do elemento. Sendo assim, areias muito grossas podem resultar em filtração ineficiente e podem ocasionar o entupimento dos emissores, enquanto areias muito finas podem entupir rapidamente seus poros e requererem retro lavagens frequentes

(MESQUITA; TESTEZLAF; RAMIREZ, 2012). Segundo Souza (2007), os filtros podem ser classificados conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Classificação dos filtros

Taxa de filtração		Sentido do fluxo	
Baixa (2,4 a 9,66 m ³ /m ²)	Alta (120 a 480 m ³ /m ²)	Ascendente	Descendente
Número de camadas		Pressão de operação	
Simplex (uma camada filtrante)	Múltiplas camadas	Pressão acima da atmosférica	Pressão por gravidade

Fonte: Adaptado de Souza (2007).

O tipo de filtro mais utilizado é o filtro de areia com taxa de filtração alta e por meio da pressão por gravidade. Esse sistema é composto por camadas de areia e brita, que são revestidas por uma estrutura de concreto, dotadas de drenos que regularizam o fluxo da água filtrada (DI BERNARDO; DANTAS, 2006). O uso de uma granulometria de areia mais fina, associado a maiores taxas de filtração, resulta em maiores perdas de pressão, o que proporciona uma maior remoção de partículas (MESQUITA et al., 2012). Segundo Puig-Bargués et al. (2005), o filtro de areia apresenta eficiência positiva na remoção de partículas a partir de 25 µm e pode atingir até 100% de eficiência na remoção a partir do diâmetro de 125 µm.

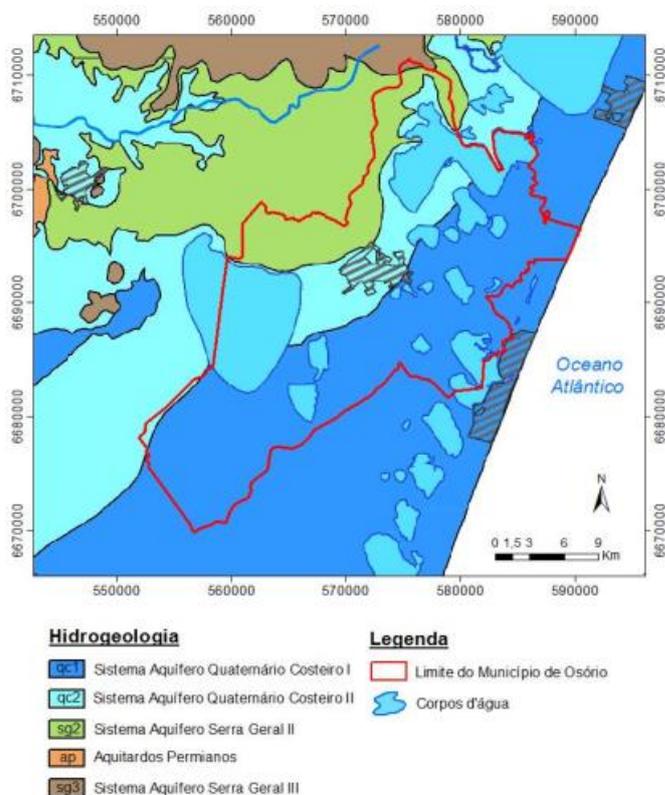
3 Materiais e Métodos

Nesse trabalho comparou-se a eficiência de diferentes sistemas de ozonização-filtração para o tratamento de uma água subterrânea coletada em um ponto específico no município de Osório, no Rio Grande do Sul. A diferenciação entre os sistemas se deu a partir da alteração da vazão de Ozônio, do tempo de contato e do meio filtrante. Todos os experimentos e análises foram realizadas no Laboratório de Estudos em Couro e Meio Ambiente (LACOURO) do Departamento de Engenharia Química da UFRGS. A metodologia foi dividida em 4 etapas principais, sendo elas: coleta da amostra, planejamento experimental, caracterização e análise de resultados.

3.1 Coleta

O município de Osório está localizado no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, fazendo limite com os municípios de: Caraá e Maquiné, ao norte; Imbé e Xangri-lá, ao leste; Santo Antônio da Patrulha, a oeste; e Tramandaí, Cidreira e Capivari do Sul, ao sul. Possui uma área de 663,55 km², estando 20 metros acima do nível do mar, e a uma distância de aproximadamente 100 km da capital do estado, Porto Alegre. Osório possui cinco distritos: Santa Luzia, Atlântida Sul, Aguapés, Passinhos e Borússia. Na Figura 5, observa-se a hidrogeologia da região estuda.

Figura 5: Mapa Hidrogeológico da área de estudo



Fonte: Adaptado de Machado & Feiras (2005).

O ponto de coleta foi no Distrito de Atlântida Sul, pertencente ao Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I e poço do tipo ponteira, como é mostrado na Figura 6.

Figura 6: Poço do tipo Ponteira



Fonte: O Autor (2023).

A amostra do Experimento I, amostra I, foi acondicionada em um galão de polipropileno 5 litros e acidificada com ácido nítrico 80% para pH menor que 2. Enquanto as amostras do Experimento II, amostra II, foram refrigeradas a uma temperatura menor que 4°C em garrafa PET e teve suas análises e ensaios feitos em menos de 48h.

3.2 Planejamento Experimental

Foram realizados experimentos de ozonização-filtração seguindo um planejamento experimental do tipo 2³. No Experimento I, variou-se três fatores em dois níveis: nível baixo (-1) e nível alto (+1). Os três fatores foram o tempo de contato, variado entre 10 e 20 minutos, a vazão de Ozonização, estabelecida entre o mínimo (20%) e o máximo (100%) de produção do equipamento, e o meio filtrante, areia comercial fina e grossa. Desta forma, foram realizados 8 experimentos, cuja composição pode ser verificada na Tabela 4.

Tabela 4: Fatores e níveis do Experimento I

Experimento I	Tempo de Contato (minutos)	Vazão de Ozônio (g/h)	Meio Filtrante (areia)
I-A1	10	2	Grossa
I-A2	10	2	Fina
I-B1	10	10	Grossa
I-B2	10	10	Fina
I-C1	20	2	Grossa
I-C2	20	2	Fina
I-D1	20	10	Grossa
I-D2	20	10	Fina

Fonte: O Autor (2023).

No Experimento II, variou-se apenas dois fatores, o tempo de contato e a vazão de ozônio, com as mesmas condições do experimento anterior, descrito na Tabela 5.

Tabela 5: Fatores e níveis do Experimento II

Experimento II	Tempo de Contato (minutos)	Vazão de Ozônio (g/h)
II-A	10	2
II-B	10	10
II-C	20	2
II-D	20	10

Fonte: O Autor (2023).

O objetivo principal foi verificar se os fatores estudados influenciam na oxidação do ferro e na purificação da água. E a influência dos métodos de conservação da amostra como objetivo secundário.

O planejamento dos experimentos não considerou os seguintes fatores: tempo entre o fim da ozonização e o início da filtração, exposição das amostras coletadas ao oxigênio ambiente e a possibilidade de contaminação de ferro presente nos pedregulhos do meio filtrante.

3.3 Aparato Experimental

Para a realização dos experimentos foi utilizado o gerador de ozônio Ozonic C-10, da Ozonic Brasil. Este equipamento utiliza ar atmosférico, na vazão de 5 L/min, para gerar 10 g/h de ozônio. A montagem do experimento pode ser observada na Figura 7. Para cada experimento foi utilizado um volume de 200 mL de água em um frasco com capacidade de 500 mL com tampa adaptada com mangueiras para a entrada e saída de gás. A mangueira estava submersa no líquido permitindo a entrada de ozônio, com um difusor em sua extremidade, e duas outras para a saída de gás após a reação estava acima do líquido, permitindo que o gás fosse encaminhado para frascos contendo uma solução aquosa de iodeto de potássio 2% para reagir com o ozônio residual antes de liberá-lo ao ambiente externo na forma de oxigênio.

Figura 7: Montagem do experimento



Fonte: O Autor (2023).

Após a ozonização, o volume das amostras foi dividido e passou-se por uma coluna de filtração direta de fluxo descendente por gravidade, uma recheada de areia fina comercial e outra, grossa, mostrado na Figura 8. O meio filtrante teve espessura de 20 cm e um tempo médio de filtração de 25 minutos. Coletou-se 50mL de cada amostra. Após a filtração coletou-se 50 mL de amostra para cada meio filtrante utilizado no experimento. Posteriormente, o filtro foi limpo e preparado para os próximos ensaios.

Figura 8: Coluna de filtração



Fonte: O Autor (2023).

3.3.1 Meio filtrante

As areias utilizadas foram compradas em sacos de 20 kg em uma Ferragem do distrito de Atlântida Sul. No laboratório, secou-se a 105 °C em estufa por 30 minutos e, após esse período, retirou-se uma quantidade para caracterização. A distribuição granulométrica foi determinada por peneiramento a seco sob agitação utilizando peneiras graduadas na escala Mesh.

3.3.2 Espectrofotometria

Para a determinação da quantidade de ferro das amostras, utilizou-se o método espectrofotométrico de absorção molecular com a ortofenantrolina. O equipamento utilizado foi espectrofotômetro visível Genesys 30 da Thermo Scientific, cuja análise permite investigar comprimentos de onda de 325 nm a 1100 nm. Utilizando o comprimento de 510 nm de onda foram feitas leituras de absorbância para seis diferentes concentrações conhecidas. Desta forma, foi feita uma regressão linear que forneceu uma equação, permitindo, então, determinar a concentração de Ferro nas amostras.

3.4 Caracterização Físico-químicas

A determinação da turbidez foi feita no Turbidímetro Hanna Instruments (modelo HI88703), adicionando-se 10 mL de amostra no equipamento. Para a análise do pH e da Condutividade foram utilizados pHmetro e Condutivímetro digitais, da marca Digimed, modelos DM-22 e DM-32, respectivamente. Para análise do pH em campo foi utilizado Papel Fita De Ph 0-14 da marca Merck.

A quantidade de matéria orgânica foi calculada a partir da análise de Carbono Orgânico Total (COT), realizado pela Central Analítica do Departamento de Engenharia Química. O equipamento é da marca Shimadzu, modelo TOC-VCSH, utiliza o método de oxidação por combustão catalítica na temperatura de 680 °C . Todo carbono presente na amostra líquida é oxidado a dióxido de carbono (CO₂), que é detectado no detector de infravermelho não dispersivo (NDIR). A área do pico de CO₂ detectada é proporcional à concentração de carbono total na amostra, de acordo com uma curva de calibração.

3.5 Análise dos resultados

Os dados obtidos como resultados foram tabulados no software Excel e passaram por tratamento estatístico de análise de variância.

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para a caracterização do meio filtrante, a determinação da curva de calibração e os experimentos de ozonização-filtração, assim como a discussão e comparação dos mesmos com dados presentes na literatura.

4.1 Caracterização da Areia

Os resultados da análise granulométrica do meio filtrante estão apresentados nas Tabela 6 e 7. Durante o processo de tamisação e pesagem da amostra, houve perdas de material, os quais foram menores que 0,3 % em relação à massa inicial de cada amostra.

Tabela 6: Análise Granulométrica da areia comercial grossa

Análise Granulométrica	Massa inicial da areia grossa = 500,00g		
Abertura da peneira (mm)	Massa de areia grossa (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
0	24,27	4,86	4,86
0,177	232,6	46,62	51,49
0,5	81,97	16,43	67,92
1,19	129,76	26,01	93,93
4,76	30,28	6,07	100
Total	498,88	100	

Fonte: O Autor (2023).

O meio filtrante constituído pela areia grossa apresentou bastantes pedras pequenas com diâmetros maiores que 1 mm, comportamento muito comuns em areias comerciais. A grande variação de tamanhos acarreta numa não uniformidade e em um valor maior do diâmetro efetivo, tornando maior a permeabilidade da areia, ou seja, a facilidade da água em percolar sem remover as partículas indesejáveis.

Tabela 7: Análise Granulométrica da areia comercial fina

Análise Granulométrica		Massa inicial da areia fina = 345,00g	
Abertura da peneira (mm)	Massa de areia fina (g)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
0	41,23	11,97	11,97
0,177	300,24	87,19	99,16
0,5	1,1	0,32	99,48
1,19	1,25	0,36	99,85
4,76	0,53	0,15	100
Total	344,35	100	

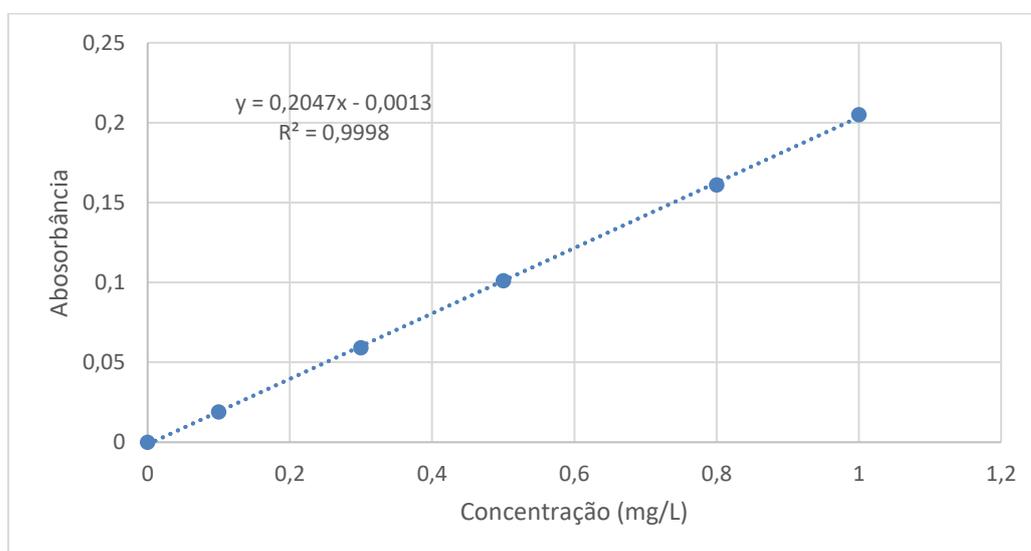
Fonte: O Autor (2023).

O resultado da análise granulométrica da areia fina apresenta um material muito mais uniforme quando comparado com a areia grossa. Mais de 99% da amostra apresenta um tamanho de partícula menor que 0,2 mm, sendo assim, mais eficiente na remoção de partículas.

4.2 Determinação da Curva de Calibração

A curva de calibração para determinação do ferro foi feita a partir da diluição de uma amostra com valor conhecido, a qual obteve um coeficiente de correlação (R^2) de 0,9998, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9: Curva de calibração de concentração de Ferro



Fonte: O Autor (2023).

4.3 Determinação da Matéria Orgânica

Através da análise de Carbono Orgânico Total foi possível estimar a quantidade de matéria orgânica presente nas amostras de água, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Análise de Carbono Orgânico Total

Amostra	Método de preservação	COT (ppm)
I	Adição Química	3,615
II	Refrigeração	1,492

Fonte: O Autor (2023).

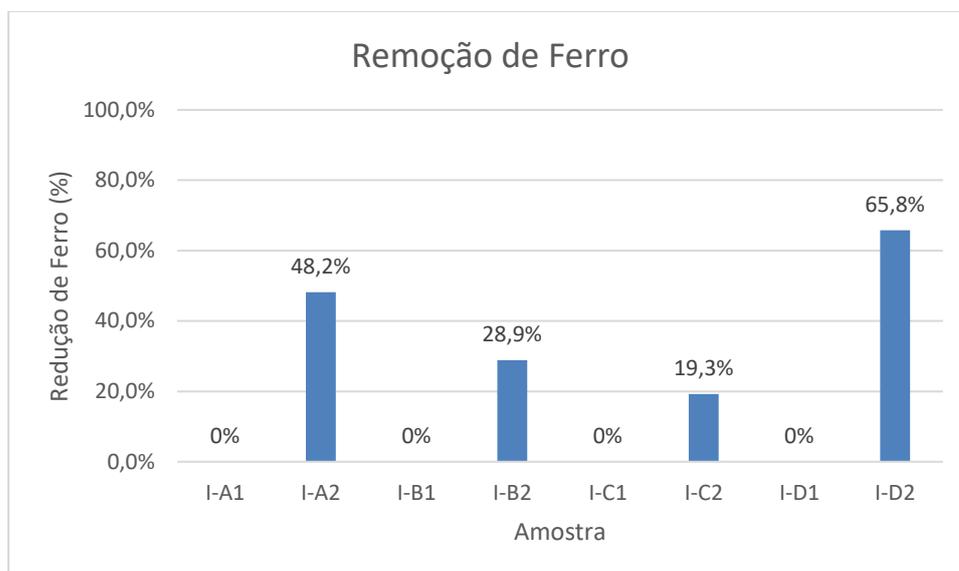
4.4 Experimento I - Ajuste de pH

Como a amostra foi coletada e adicionado HNO_3 para não ocorrer a precipitação, dessa forma, não foi possível retornar ao pH original. Nos experimentos em que tentou-se retornar ao pH original, as amostras atingiram um pH alcalino, e apresentaram coloração marrom-amarelada e alta turbidez, o que pode ser explicado em razão de que valores alcalinos de pH, acima de 8, são favoráveis à precipitação do ferro. Desse modo, optou-se por realizar as análises no pH em que a amostra se encontrava, $\text{pH} < 2$, visto que não é adequado a alteração de pH para uma água destinada a consumo.

Com o intuito de verificar a capacidade do ozônio de oxidar o ferro, analisou-se as concentrações das amostras logo após o tratamento de ozonização. Tanto para a amostra I-A, I-C e I-D, não houve redução da concentração do metal, e a amostra B obteve uma variação insignificante, em torno de 2%, podendo-se considerar que o tratamento de ozonização não foi eficiente para a remoção do ferro, mas sim, a conversão de sua forma. Por estar em faixa de pH ácido, a ação do ozônio é predominantemente direta, proporcionando uma oxidação mais lenta na qual o tempo de contato estabelecido para as amostras não foi suficiente para que houvesse a remoção desejada. Além disso, a amostra I apresentou maior quantidade de matéria orgânica, os ácidos húmicos e fúlvicos formam complexos orgânicos com o Ferro que são mais difíceis de serem removidos por oxidação e subsequente precipitação do $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Após essa análise intermediária, prosseguiu-se o tratamento para a etapa de filtração. De maneira a facilitar a visualização, o gráfico resultante da ozonização-filtração foi organizado de modo a se comparar a eficiência de remoção de ferro em cada amostra apresentado na Figura 10.

Figura 10: Valores da redução de Ferro após os tratamentos de ozonização e filtração



Fonte: O Autor (2023).

Mesmo com um processo de ozonização não eficiente, as amostras que passaram pelo filtro de areia fina, obtiveram resultados satisfatórios na remoção de ferro, mostrando que a atuação dos fenômenos de fisi e quimissorção resultantes da interação entre o material de diâmetro efetivo maior e as partículas indesejadas foram eficientes. Já as amostras I filtradas pela areia grossa não obtiveram uma redução significativa do composto e em alguns casos houve o aumento da concentração de ferro, como mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Concentração de Ferro nas amostras após tratamento ozonização/filtração

Concentração de ferro da água bruta: 3,04 mg/L			
Amostra	Concentração (mg/L)	Amostra	Concentração (mg/L)
I-A1	7,59	I-C1	9,59
I-A2	1,58	I-C2	2,46
I-B1	7,73	I-D1	4,02
I-B2	2,16	I-D2	1,04

Fonte: O Autor (2023).

A melhor remoção foi o experimento I-D2, com percentual de remoção de aproximadamente 66%, no qual a amostra ficou o maior tempo em contato com o ozônio em sua maior vazão e filtrou-se pela areia fina. Mas ao comparar com a legislação brasileira, o resultando não atingiu o especificado para o consumo humano, 0,3 mg/L.

O fato do uso da areia comercial como meio filtrante, a qual não se sabe ao certo a sua composição e presença de muitos pedregulhos, pode ser o responsável pelo aumento da

concentração do metal. Ao final do tratamento de ozonização, pode haver algum residual de oxidante que ao percolar a coluna de filtração ou por ser uma amostra muito ácida, reage com o material presente, que, se tiver ferro na sua composição, libera na água que está sendo percolada, aumentando a concentração. Como cada amostra teve um tempo de espera diferente entre o final da ozonização e o início da filtração, o residual de oxidante pode ter sofrido alterações, tendo ações diferentes em cada amostra.

Após a análise gráfica, as medidas de todas as condições de tratamento foram submetidas à análise de variância, não considerando as interações entre os fatores, apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Anova I

Fator	valor - P
Tempo	0,7112
Vazão	0,2721
Filtro	0,0116

Fonte: O Autor (2023).

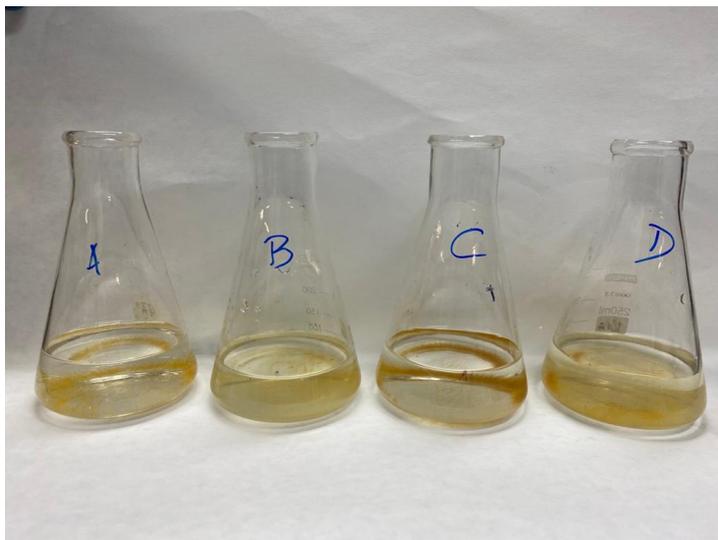
Na análise, o fator filtro mostrou diferença significativa em relação aos demais fatores sozinhos, ou seja, as amostras ao passarem pelo meio filtrante com a areia de granulometria fina tiveram uma maior remoção do ferro.

4.5 Experimento II – Refrigeração

Como os resultados obtidos para a remoção de ferro no Experimento I não foram satisfatórios, principalmente pelo método de conservação ácida escolhido, decidiu-se fazer uma nova coleta de água, a qual foi mantida sob refrigeração e realizou-se os mesmos ensaios de ozonização seguido de filtração. Entretanto, nesse experimento optou-se por usar somente a areia fina como meio filtrante, visto que a utilização dela se mostrou mais eficiente quando comparado com a areia grossa no Experimento I.

A amostra coletada, após ser submetida ao tratamento de ozonização, apresentava uma coloração marrom-amarelada leve, evidenciando que ocorreram transformações das espécies metálicas, de solúveis para oxidadas. Ao longo do tempo em que foi posta em repouso, as amostras foram se tornando mais límpidas e com tom mais suave de cor à medida em que material particulado se depositava no fundo do Erlenmeyer. Na Figura 11 há um registro para ilustrar a mudança que ocorreu nas amostras após o tratamento.

Figura 11: Amostras II após ozonização



Fonte: O Autor (2023).

O processo de filtração foi realizado em seguida da ozonização, de maneira que as partículas ainda estavam em suspensão e não sedimentadas no fundo do Erlenmeyer. Na Figura 12 é comparado o filtro ainda seco e após as filtragens dos experimentos.

Figura 12: Comparação entre os filtros de areia



Fonte: O Autor (2023).

É possível observar que após a passagem da amostra do Experimento II, o filtro apresenta uma faixa alaranjada devido a retenção do material particulado, o que não ocorre no Experimento I. Na Tabela 11 são exibidos os valores para o parâmetro de ferro total alcançado após as etapas de tratamento.

Tabela 11: Concentração de Ferro nas amostras após tratamento

Amostra	Concentração Ferro (mg/L)
Bruta	1,24
II-A	0,04
II-B	0,01
II-C	0,04
II-D	0,05

Fonte: O Autor (2023).

Todas as amostras II tiveram redução significativa na concentração do ferro, acima de 96%, atingido valores adequados para o consumo humano de acordo com a legislação. Como não foi adicionado produtos químicos para a preservação da amostra, o pH da amostra bruta encontrava-se em torno de 5, valor maior quando comparado as amostras I. Dessa forma a reação principal do ozônio ocorre de forma indireta, uma ação mais rápida, embora menos seletiva. Então, os tempos de contatos e a vazão foram suficientes para oxidar grande parte do metal presente na amostra e a filtração com areia fina foi adequada para retenção do composto.

Com os fatores de vazão e tempo de contato, realizou-se uma nova regressão para analisar as significâncias dos fatores, mostrado na Tabela 12.

Tabela 12: Anova Experimento II

Fator	Valor-P
Tempo	0,4208
Vazão	0,6051
Tempo x Vazão	0,1662

Fonte: O Autor (2023).

A análise mostrou que não há diferença estatística entre os fatores nem a interação entre eles, de modo que o aumento do tempo ou da vazão de ozônio não seriam eficientes para uma maior remoção do Ferro. Com o objetivo atingido nesse experimento, realizou-se as outras análises dos parâmetros de qualidade, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13: Parâmetro de qualidade das amostras II

	pH	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	Turbidez (μT)
Bruta	4-5	139,6	0,20
II-A	5,53	148,6	0,15
II-B	4,83	207,6	0,15
II-C	5,26	122,7	0,15
II-D	4,73	151,3	0,15

Fonte: O Autor (2023).

A determinação do pH foi realizada em campo com papel indicador na coleta da amostra, por isso não foi possível uma determinação exata, mas uma aproximação. Todas as amostras, inclusive a de água bruta tiveram resultados abaixo do recomendado para o consumo de água, conforme a Portaria GM/MS Nº888/2021. Na análise da condutividade elétrica, ocorreram algumas oscilações de resultado, mas todos dentro do esperado. Quanto a turbidez, a amostra bruta já apresentava uma condição adequada, mas depois do tratamento obtiveram resultados ainda melhores.

4.6 Discussão dos resultados

O experimento I realizado com as amostras que foram acidificadas não obtiveram os resultados esperados, dessa forma, foi necessário entender os fatores que levaram a esses números. A principal influência deve-se ao pH que, por ser extremamente ácido, fez com que a reação de ozonização se desse de forma direta, o que não era desejado para o estudo. Além disso, o uso da areia comercial grossa, a qual aumentou a concentração de Ferro nas amostras, mostra que em um tratamento onde há sequência de processo, onde um deles possa deixar residuais de oxidante, é muito importante avaliar se poderá haver relação entre eles, como no caso do experimento I que o ozônio ainda dissolvido no líquido ao percolar a areia reagiu com o material ali presente. Dessa forma, o experimento I, com o ajuste de pH, serviu para indicar que a areia comercial fina é eficaz para o tratamento proposto.

Com a realização de uma nova coleta de amostras as quais ficaram sobre refrigeração e em pouco tempo foram tratadas, os resultados foram positivos para a redução de ferro através da técnica de ozonização. Todos os testes se mostraram eficiente, como também o método de preservação. As amostras tiveram uma redução acima de 96% da quantidade de Ferro presente na amostra bruta. O tratamento também melhorou os valores referentes a turbidez, quanto ao pH, a amostra inicial já estava abaixo do recomendando, não houve alterações significantes, o parâmetro necessita uma correção adicional em todos os casos.

A amostra coletada e mantida em refrigeração, ao ser deixada em temperatura ambiente, começa a sofrer reações que foram retardadas pela ação da temperatura, tendo um aumento elevado da turbidez. Na Figura 13 é possível observar a água bruta, em temperatura ambiente, ao lado das amostras da mesma água tratada.

Figura 13: Comparação entre a Água bruta e as tratadas



Fonte: O Autor (2023)

Os resultados de redução de concentração de ferro apresentados neste trabalho podem ser comparados com os obtidos por Débora Emboaba (2019) no seu estudo comparativo de remoção de ferro e manganês de solução aquosa por ozonização seguida de filtração utilizando areia, zeólita e carvão ativado granular. No seu trabalho, a autora prepara água sintética com diferentes proporções de Fe/Mn (1 mg Fe/L + 4 mg Mn/L e a outra 3 mg Fe/L + 4 mg Mn/L), as amostras não sofrem alterações de concentração de ferro total quando as amostras passaram da condição bruta para a ozonizada. E isso aconteceu porque a água sintética foi produzida a partir do sulfato ferroso, que ao se dissociar formam íons Fe^{+2} , então a ozonização não promoveu a remoção de ferro, mas a conversão da sua forma. Mas, ao serem filtradas, ambas as amostras sofreram reduções nos valores desse parâmetro porque as formas de Fe^{+3} , originadas da ozonização, ficaram retidas no meio filtrante.

A amostra com menor concentração de ferro atingiu eficiências de remoção de 29, 48 e 54% para os filtros de zeólita, areia e carvão, respectivamente, ao passo que a outra amostra obteve 100% de remoção de ferro em todos os filtros testados. Esses resultados corroboram com os apresentados neste trabalho, visto que por se tratar de água sintética não há outros interferentes no processo, como o caso da água natural. Então, os valores de eficiência são superiores quando comparados as amostras com menor concentração de ferro e próximos ao com maior concentração, e utilizando somente o filtro de areia, o qual possui o menor valor econômico.

O trabalho apresentado pro Débora Emboaba (2019) submeteu as amostras a três níveis de produção de ozônio (mínima, média e máxima produção do equipamento). Verificou-se que nenhum nível interferiu de modo a diminuir ou elevar a eficiência do tratamento, a autor optou por trabalhar com o nível mínimo de produção de ozônio nos seus ensaios, correspondente à produção de 3 g/h. Entretanto, o presente trabalho mostrou que é possível reduzir ainda mais esse valor ao usar a vazão de ozônio em 2 g/h e alcançar os mesmos objetivos.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O ozônio se mostrou uma alternativa para tratamento de águas residências, sendo essa técnica viável para aplicações tendo como objetivo a remoção de metais solúveis na água, visto que o processo de ozonização não demanda nenhum pré-tratamento. As variações de vazão e tempo de contato não se mostraram significantes, podendo ser usado a menor vazão em um menor tempo que atinge o objetivo proposto e é melhor economicamente. Entre as areias comerciais propostas pelo trabalho, como possuem o mesmo valor econômico, a de granulometria fina demonstrou ser o melhor material para filtração.

O tratamento de ozonização seguido de filtração se mostrou eficiente para a redução de Ferro nas amostras, atingindo valores permitidos na Legislação para o consumo humano. Em relação aos outros parâmetros analisados, somente o pH ficou abaixo do requerido, mas a adição de produto básico específico já é suficiente para ajustá-lo.

A maneira de preservação da amostra com o reagente químico HNO_3 não se mostrou adequada, visto que interferiu nos experimentos, não sendo um teste fidedigno e nem aplicável para consumo da amostra. A refrigeração foi uma ótima alternativa para tentar manter a estabilidade da água do poço, deixando ela o mais próximo possível de suas características originais.

Alguns trabalhos futuros que podem ser realizados para complementar o que foi discutido são:

- Análise mais apurada da matéria orgânica presente na água e suas relações com os átomos de Ferro;
- Experimentos utilizando somente o processo de filtração a fim de avaliar a influência da ozonização na remoção de ferro da água subterrânea do município de Osório avaliada no presente trabalho;
- Estudos dos outros parâmetros de potabilidade da água com a finalidade de torná-la potável para consumo humano;
- Realizar o experimento de ozonização-filtração no próprio local de coleta da água;
- Dimensionamento e análise econômica desse tratamento para implementação em residências.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores.** 1967.

ALMANY COSTA SANTOS. Qualidade das Águas Subterrâneas. *Em*: FEITOSA, M. I. *et al.* (org.). **HIDROGEOLOGIA - Conceitos e Aplicações.** 3º Edição. Brasil: COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS / SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM / SGB), 2008. p. 325–357.

ALMEIDA, M. C.; SILVA, M. M.; PAULA, M. de. Avaliação do desempenho de uma estação de tratamento de água em relação à turbidez, cor e pH da água. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, [s. l.], p. 25–40, 2017.

BRANDÃO, C. J. *et al.* (org.). **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos.** Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, , 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde e Gabinete do Ministro. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, 7 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou>. Acesso em: 7 fev. 2023.

BRASIL. Resolução Conama nº396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Seção 1, n. 66, p. 64–68, 7 abr. 2008.

CARDOSO, J. M. **Avaliação da qualidade da água subterrânea de poços tubulares outorgados no município de Campo Grande – MS.** 2019. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2019.

DA SILVA, S. *et al.* Potencialidades do uso do ozônio no processamento de alimentos. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 659–682, 2011.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, Â. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 11, p. 107–107, 2006.

ECKHARDT, R. *et al.* Mapeamento e avaliação da potabilidade da água subterrânea do município de Lajeado, RS, Brasil. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 58–80, 2009.

EMBOABA, D. G. **Estudo comparativo de remoção de ferro e manganês de solução aquosa por ozonização seguida de filtração utilizando areia, zeólita e carvão ativado granular.** 2019. Dissertação (Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental) - UNICENTRO, Irati, Paraná, 2019.

FERREIRA FILHO, S. S.; SAKAGUTI, M. Comportamento cinético do cloro livre em meio aquoso e formação de subprodutos da desinfecção. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 198–206, 2008.

FONTANA, A. **Fracionamento da matéria orgânica e caracterização dos ácidos húmicos e sua utilização no sistema brasileiro de solo**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2009.

HERRÁIZ, A. S. La importancia de las aguas subterráneas. **Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, [s. l.], v. 103, n. 1, p. 97–114, 2009.

HUELVA LÓPEZ, R. *et al.* Propiedades químicas y química-físicas de derivados estructurales de ácidos húmicos obtenidos de vermicompost. Actividad biológica. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 56–60, 2013.

JEONG, C. Y.; YOUNG, S. D.; MARSHALL, S. J. Competitive Adsorption of Heavy Metals in Humic Substances by a Simple Ligand Model. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 71, n. 2, p. 515–528, 2007.

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2005.

MELO, M.; COSTA, B.; AQUINO, O. de. REMOÇÃO DE FERRO E SÍLICA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA VISANDO GERAÇÃO DE VAPOR: ESTUDO DE CASO. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23826>. Acesso em: 7 mar. 2023.

MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; RAMIREZ, J. C. S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 115, p. 178–185, 2012.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial – uma abordagem geral. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 29–43, 2012.

MOTHÉ, G. P. B. **Capacidade fotossintética e crescimento de dois genótipos de ricinus communis L., em resposta a doses de material sólido particulado a base de ferro aplicadas ao solo**. 2012. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2012.

PASCHOALATO, C. F. P. R.; TRIMAILOVAS, M. R.; DI BERNARDO, L. Formação de subprodutos orgânicos halogenados nas operações de pré-oxidação com cloro, ozônio e peróxido e pós-cloração em água contendo substância húmica. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 313–322, 2008.

PIRES, A. M. M.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de. Amostragem de água para análise de nitrato e metais pesados. *Em*: MANUAL DE PROCEDIMENTOS DE COLETA DE AMOSTRAS EM

ÁREAS AGRÍCOLAS PARA ANÁLISE DA QUALIDADE AMBIENTAL: SOLO, ÁGUA E SEDIMENTOS. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p. 103–108.

PUIG-BARGUÉS, J. *et al.* Effluent particle removal by microirrigation system filters. **Spanish Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 182–191, 2005.

RAMOS, R. de O. *et al.* Complexação de ferro e manganês em presença de orto-polifosfato para otimização de tratamento de água de abastecimento: estudo de caso. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, [s. l.], p. 1085–1097, 2020.

REBOUÇAS, A. da C. Importância da Água Subterrânea. *Em*: FEITOSA, F. A. C. *et al.* **Hidrologia: Conceito e Aplicações**. 3º ed.ed. Rio de Janeiro: COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS / SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM / SGB), 2008. p. 13–29.

REGINATO, P. A. R.; MICHALSKI, E. Z.; PAIM, R. A. Água Subterrânea. *Em*: SCHAFER, A.; LANZER, R. (org.). **Atlas Socio Ambiental do Município de Osório**. 2º Ediçãoed. Caxias do Sul: EDUCS · Editora da Universidade de Caxias do Sul, 2017. p. 210–218.

SANTOS, T. L. dos. **Estudo teórico da interação de modelos análogos dos ácidos húmicos com íons metálicos Fe +3 e Al +**. 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Rio de Janeiro, 2016.

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. *Em*: FEITOSA, F. A. C. *et al.* **Hidrologia: Conceito e Aplicações**. 3º ed.ed. Rio de Janeiro: COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS / SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM / SGB), 2008. p. 325–357.

SILVA, C. F. da. **Relação entre carbono orgânico dissolvido (COD) e elementos metálicos em águas naturais da porção leste do Quadrilátero Ferrífero - MG**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

SOUZA, W. A. de. **Tratamento de água**. [S. l.]: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2007. *E-book*. Disponível em: <http://memoria.ifrn.edu.br/handle/1044/997>. Acesso em: 7 mar. 2023.

SPERLING, M. V. **Introdução à Qualidade das águas e ao Tratamento de Esgotos**. 4ª ediçãoed. [S. l.]: Editora UFMG, 2011.

TONETTI, A. L. *et al.* O emprego do filtro de areia no pós-tratamento de efluente de filtro anaeróbio. [s. l.], 2004.