

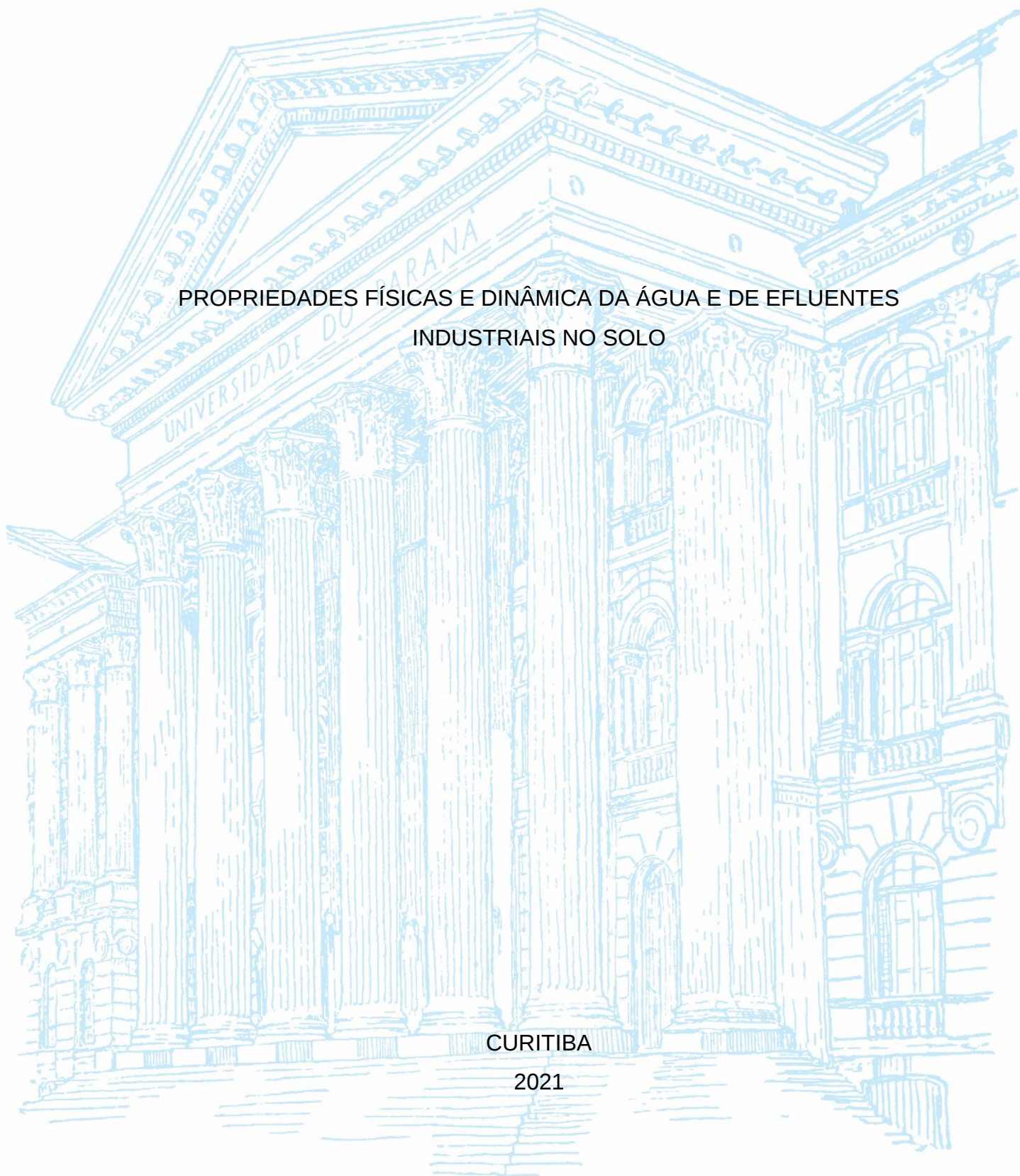
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA APARECIDA GONÇALVES

PROPRIEDADES FÍSICAS E DINÂMICA DA ÁGUA E DE EFLUENTES
INDUSTRIAIS NO SOLO

CURITIBA

2021



CAROLINA APARECIDA GONÇALVES

PROPRIEDADES FÍSICAS E DINÂMICA DA ÁGUA E DE EFLUENTES
INDUSTRIAIS NO SOLO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. André Carlos Auler

CURITIBA
2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

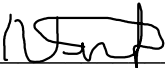
TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

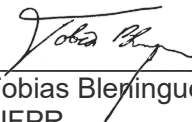
CAROLINA APARECIDA GONÇALVES

PROPRIEDADES FÍSICAS E DINÂMICA DA ÁGUA E DE EFLUENTES INDUSTRIAIS NO SOLO

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 8.5, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): 
Prof. Dr. André Carlos Euler
DSEA / UFPR

Membro(a) 1: 
Profa. Dra. Nerilde Favaretto
DSEA / UFPR

Membro(a) 2: 
Prof. Dr. Tobias Bleninger
DEA / UFPR

Curitiba, 20 de dezembro de 2021

Ao meu pai, Luiz Carlos Gonçalves (*in memoriam*), meu maior incentivador e quem sonhou com esse momento ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Às empresas Chocoleite Indústria de Alimentos Ltda, Essencis Soluções Ambientais, Grupo Malwee e Schattdecor do Brasil por disponibilizarem seus efluentes para o estudo, e pela disponibilidade em atender as dúvidas.

Ao Horácio Manfrin Mazero, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por enorme disponibilidade, me ajudando por fins de semana inteiros e noites de sextas-feiras no procedimento experimental, e na análise dos resultados. Por ser sempre solícito as minhas dúvidas, e principalmente pelo apoio emocional.

Ao meu orientador, André Carlos Auler, que acreditou em mim quando eu mesma descreditei. E se dispôs a estar na faculdade para me ajudar até aos fins de semana. E pelos memes.

À Gabriela Vieira, quem embarcou nesse projeto comigo, e a quem desejo muito sucesso no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos, com um agradecimento especial ao Andrei Chadanowicz pela companhia no laboratório, a Beatriz Silvestre e a Fernanda Dercoski, que foram minhas ouvintes sobre as experiências desse momento, e me deram muito apoio e suporte emocional.

À Sheila Faria, que mesmo distante se fez presente nesse momento.

Ao Gabriel Vasem por me ajudar com a montagem do Permeâmetro, e por me lembrar do meu potencial nos momentos difíceis.

À minha mãe, pelo amor incondicional, sem o qual eu não estaria onde estou hoje, e por me acompanhar em mais esse momento da vida.

E ao meu pai (*in memoriam*), que sempre me proporcionou o melhor em todos os aspectos.

RESUMO

No Brasil não existe, a nível federal, legislação que trate dos parâmetros para deposição de efluentes em solos. Alguns efluentes são ricos em nutrientes e matéria orgânica, sendo atrativo para irrigação de culturas agrícolas, ou para irrigação paisagística, em substituição ao retorno do efluente tratado ao corpo hídrico. Porém não existem muitos estudos que demonstrem a consequência aos solos da aplicação de efluentes de diferentes nichos industriais. Dessa forma o presente estudo, por meio de desenvolvimento de um permeâmetro de carga constante, e mesa de tensão de baixo custo, procurou avaliar o impacto a curto prazo da aplicação de efluentes em um solo argiloso. Os ensaios foram realizados sob três cenários. O primeiro sendo a saturação das amostras em água, e percolação do efluente, o segundo cenário saturação e percolação do efluente, e por último saturação no efluente e percolação em água deionizada. Após passagem em mesa de tensão foram medidos densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade. Todos os resultados foram submetidos a análise de variância, teste de Shapiro-Wilk e Bartlett, para verificação de normalidade dos resíduos e homoscedasticidade. Observou-se de maneira geral a diminuição no valor da condutividade hidráulica, exceto para o efluente de estação de tratamento (mistura de diversos efluentes industriais). Os resultados também mostraram a relação entre a menor condutividade com o menor teor de macroporos, ambos observados em amostras que interagiram com o efluente da indústria de laticínios. Concluiu-se que o tratamento dos efluentes estudados, aplicados por curto prazo, foi efetivo quando se objetiva a não interferência nas propriedades do solo.

Palavras-Chave: Poluição do solo. Condutividade hidráulica, Macroporosidade. Microporosidade. Permeâmetro de carga constante. Fertirrigação.

ABSTRACT

In Brazil there is no federal legislation dealing with parameters for deposition of effluents in soils. Some effluents are rich in nutrients and organic matter, being attractive for crop irrigation, or for landscape irrigation, replacing the regress of treated effluent to the water body. However, there are not many studies that demonstrate the consequences to soils due to application of effluents from different industrial niches. Thus, the present study, through the development of a constant head permeameter and a low-cost tension table, sought to assess the short-term impact of effluent application in a clayey soil. The tests were carried out under three scenarios. The first being sample saturation in water, and 6fluente percolation, the second scenario being 6fluente saturation and percolation, and lastly 6fluente saturation and percolation in deionized water. Then, pass through a tension table, soil density, total porosity, macro and microporosity were measured. All results were submitted to analysis of variance, Shapiro-Wilk and Bartlett tests, to verify the normality of residuals and homoscedasticity. In general, a decrease in the hydraulic conductivity value was observed, except for the effluent from the treatment plant (mixture of various industrial effluents). The results also showed the relation between the lowest conductivity and the lowest macropore contente, both observed in samples that interacted with the effluent from the dairy industry. It was concluded that the treatment of the studied effluents, applied for a short term, was effective when the objective is not to interfere in the soil properties.

Key-Words: Ground pollution. Hydraulic Conductivity. Macroporosity. Microporosity -Constant Head Permeameter. Fertigation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ÁREA DE AMOSTRAGEM	21
FIGURA 2 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE.....	23
FIGURA 3 – REPRODUÇÃO DO FRASCO DE MARIOTTE DO EXPERIMENTO....	24
FIGURA 4 – PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE.....	25
FIGURA 5 – ESQUEMA INTERNO DA MESA DE TENSÃO.....	26
FIGURA 6 – MESA DE TENSÃO.....	27
FIGURA 7: AMOSTRAS VEDADAS NO PERMEÂMETRO.....	29
GRÁFICO 1 - CONDUTIVIDADES HIDRÁULICAS PARA OS DIVERSOS EFLUENTES NAS TRÊS ETAPAS.....	36

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PARÂMETROS SEMACE.....	8
TABELA 2 –PARÂMETROS FEPAM.....	9
TABELA 3 – NOMENCLATURA ASSOCIADA AOS EFLUENTES COLETADOS RELACIONADO AO SEU RAMO INDUSTRIAL.....	19
TABELA 4 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO: DENSIDADE (DS), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO) E MICROPOROSIDADE (MICRO).....	32
TABELA 5 – MÉDIAS E DESVIO PADRÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO: DENSIDADE (DS), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (MACRO) E MICROPOROSIDADE (MICRO).....	33
TABELA 6 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS CONDUTIVIDADES EM CONDIÇÃO DE: SOLO SATURADO POR ÁGUA (K1), SATURADO POR EFLUENTE (K2) E DE ÁGUA COM O SOLO SATURADO PELOS EFLUENTES (K3).....	34
TABELA 7 - MÉDIAS E DESVIO PADRÃO DA CONDUTIVIDADE E ÁGUA E EFLUENTES EM CONDIÇÃO DE: SOLO SATURADO POR ÁGUA (K1), SATURADO POR EFLUENTE (K2) E DE ÁGUA COM O SOLO SATURADO PELOS EFLUENTES (K3).....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	5
1.1	OBJETIVOS.....	5
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1	LEGISLAÇÃO SOBRE O DESTINO E REUSO DE EFLUENTES NO BRASIL ..	6
2.2	OS ASPECTOS AMBIENTAIS DO REUSO DE EFLUENTES.....	9
2.2.1	Reuso de efluentes na agricultura.....	11
2.3	EFLUENTES APLICADOS AO SOLO NO BRASIL	12
2.3.1	Dejeto líquido bovino	12
2.3.2	Efluente têxtil.....	13
2.3.3	Efluente Laticínio	14
2.3.4	Efluente da Produção de Papel.....	15
2.3.5	Efluente de Galvanização.....	17
2.4	PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	17
2.4.1	Densidade do Solo	18
2.4.2	Porosidade	18
2.4.3	Condutividade Hidráulica.....	18
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS DE ESTUDO	19
3.2	COLETA E PREPARO DE AMOSTRAS DE SOLO PARA TESTES DE CONDUTIVIDADE.....	21
3.3	DESENVOLVIMENTO DE PERMEAMETRO DE CARGA PERMANENTE.....	22
3.4	DESENVOLVIMENTO DE MESA DE TENSÃO	255
3.5	ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE	277
3.6	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....	30
3.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1	PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	32
4.2	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	333
5	CONCLUSÃO.....	38
	REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

O reuso de efluentes supre demandas importantes da agricultura. É possível, por exemplo, diminuir a necessidade do uso de água potável para irrigação, diminuir gastos com fertilizantes químicos (MELI et al., 2002), e melhorar o rendimento das colheitas (AZEVEDO et al., 2007; BASTOS et al., 2015). Dessa forma, existe potencial para indústrias de diferentes setores, relacionado ao destino de seus efluentes, e um aumento no interesse do agronegócio. Contudo, esse destino dado ao efluente deve ser tratado com cautela.

No Brasil ainda não existe, a nível federal, uma legislação que trate exclusivamente de parâmetros e exigências para disposição de efluentes em solo, sendo ele agricultável ou não. A Resolução CONAMA 430/2011 trata em seu artigo 2º da disposição de resíduo líquido nos solos expressando a necessidade da não contaminação de águas subterrâneas e superficiais, sem evidenciar mais detalhes.

A falta de regulamentação pode inclinar à ideia de que não há sequelas na aplicação sem precaução de efluentes em solos. Porém é importante entender a origem do efluente a ser utilizado, e o tratamento aplicado ao mesmo, a fim de não afetar a estrutura do solo, evitar a poluição ambiental e diminuir os riscos à saúde (AMOATEY e BANI, 2011).

1.1 OBJETIVO

O presente estudo teve por objetivo analisar os impactos no solo da aplicação de efluentes industriais de diferentes ramos (laticínios, estação de tratamento, tintas, metais, têxtil e da bovinocultura) sobre as propriedades físicas e a condutividade de água e efluente em condições de solo saturado por água e efluentes.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LEGISLAÇÃO SOBRE O DESTINO E REUSO DE EFLUENTES NO BRASIL

No Brasil, a priori o despejo de efluentes tratados é feito em corpos hídricos receptores. A nível federal a Resolução 430 de 2011 dispõe sobre as condições e padrões para o lançamento de efluentes. Os parâmetros e padrões da Resolução 430/2011 do Ministério do Meio Ambiente (MMA) não contemplam a disposição de efluentes no solo. Todavia a resolução define que eles não podem causar poluição de águas subterrâneas. Evidencia-se a importância do estudo do comportamento dos efluentes no solo, sua velocidade de transporte nesse meio, e as alterações físicas que pode haver no meio físico devido a presença dos efluentes. Apesar de não contemplar o lançamento no solo a Resolução 430/2011 é usada como referência nessa área.

Além dessa, a Resolução 420 de 2009 do MMA, alterada pela Resolução 460/2013, dispõe sobre os valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas oriundas de atividades antrópicas, sendo a resolução aplicável a todo empreendimento que realize a disposição de seus efluentes no solo. Ela também define diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas. Na resolução são tratados valores limites para as substâncias no solo, os chamados Valores de Prevenção (VP), para os quais o solo é capaz de sustentar funções como mantenedor do ciclo de água e nutrientes, meio para produção de bens primários de consumo, fonte de recursos naturais, meio para práticas recreacionais, e sustentação da vida, entre outros (BRASIL, 2009). E, o Valor de Investigação (VI), valores acima de VI causam potencial risco à saúde humana, segundo o inciso XXIV do artigo Nº 6 da mesma resolução.

O estado de Ceará possui em sua legislação padrões para disposição de efluentes especificamente no solo (MORAIS e SANTOS, 2019). A resolução que trata dos parâmetros para destinação de efluentes é a COEMA Nº2 de 2019. O Artigo 15 desta legislação trata do despejo de efluentes tratados no solo, exigindo para apresentação de relatório técnico contendo diagnóstico do solo com perfil, granulometria, teor de matéria orgânica, avaliação de taxa de infiltração e teor de metais, tais como arsênio, bário, chumbo, cromo, mercúrio, prata, zinco, entre outros, também deve constar o teor de metais do efluente. O relatório deve apresentar

também a frequência e o método de aplicação do efluente no solo, a declividade da área onde será aplicado, nível e qualidade do lençol freático e modelagem da dispersão do efluente no solo, e no lençol caso o atinja. Por último, se faz necessária a apresentação de laudo conclusivo assinado por um profissional habilitado mediante Anotação de Responsabilidade Técnica (ART). Entre os parâmetros comuns para disposição de efluente em corpos hídricos, a legislação do Ceará exige o monitoramento de dois fatores para efluentes dispostos em solo: a condutividade elétrica, que não deve ultrapassar o valor de 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e Razão de Adsorção de Sódio (até 10).

O capítulo 3 da mesma resolução trata das condições e padrões para reuso, as quais podem ser divididas em cinco modalidades, sendo elas: reuso para fins urbanos, reuso para fins agrícolas e florestais, reuso para fins ambientais e para fins industriais, e reuso na aquicultura. O efluente líquido tratado teria contato com solo em duas dessas modalidades, reuso para fins urbanos, quando se considera a reutilização do efluente na irrigação paisagística, e em reuso para fins agrícolas e florestais (SEMACE, 2017). Os parâmetros exigidos para cada tipo de reuso podem ser vistos na tabela 1.

TABELA 1: PARÂMETROS SEMACE.

Parâmetros	Para fins Urbanos	Para fins agrícolas e florestais	
		Culturas a serem consumidas cruas	Demais culturas
Coliformes termotolerantes (CT 100 mL ⁻¹)	1000	ND	1000
Ovos geohelmintos (ovo L ⁻¹)	1	ND	1
Condutividade elétrica (µS cm ⁻¹)	3000	3000	3000
pH	6,0-8,5	6,0-8,5	6,0-8,5
RAS (mmol cL ⁻¹) ^{1/2}	-	15	15
Temperatura	< 40°C	< 40°C	< 40°C
Material sedimentável (mL L ⁻¹)	<1	<1	<1
Óleos minerais (mL L ⁻¹)	<20	<20	<20
Óleos vegetais e gorduras animais (mL L ⁻¹)	<50	<50	<50
Materiais flutuantes	ausente	ausente	Ausente
Cor	corantes e pigmentos virtualmente ausentes	corantes e pigmentos virtualmente ausentes	corantes e pigmentos virtualmente ausentes
Sulfeto (mg L ⁻¹)	<1	<1	<1
Nitrogênio amoniacal total (mg L ⁻¹)	até 20, (para pH≤8) até 5, (pH>8)	até 20, (para pH≤8) até 5, (pH>8)	até 20, (para pH≤8) até 5, (pH>8)
Sulfato (mg L ⁻¹)	<500	<500	<500
DQO (mg L ⁻¹)	<200	<200	<200
Cianeto Total (mg L ⁻¹)	<1,0	<1,0	<1,0
Cianeto livre (mg L ⁻¹)	<0,2	<0,2	<0,2

FONTE: Elaborada pela autora com base nos dados de SEMACE et al, (2017)

O Rio Grande do Sul possui a Portaria Nº68 da Fundação Estadual de Proteção Ambiental - FEPAM que trata da padronização dos critérios para disposição de rejeitos líquidos industriais ou não no solo. Segundo a resolução o reuso não se enquadra no contemplado pela Portaria, que tem por finalidade a padronização dos parâmetros apenas para disposição no solo de efluentes industriais que sejam de do ramo alimentício ou cujo efluente possua alta carga orgânica (FEPAM, 2019). Faz-se necessário para permissão do despejo em solo um estudo de viabilidade ambiental onde conste avaliação de impactos qualitativos e quantitativos sobre o solo e águas subterrâneas.

Na tabela 2 é possível observar os valores máximos determinados de DBO, DQO, e sólidos suspensos totais (SST) conforme a vazão de efluente por dia. A FEPAM indica que o pH, independente da vazão diária de efluente, deve estar entre 6 e 9, e caso contenha óleos e graxas minerais seu valor deve ser de até no máximo 10 mg L⁻¹, já para óleos e graxas vegetais ou animais é de até 30 mg L⁻¹.

TABELA 2: PARÂMETROS FEPAM

Vazão (m³ dia ⁻¹)	DBO (mg L ⁻¹)	DQO (mg L ⁻¹)	SST (mg L ⁻¹)
Q < 200	120	330	140
200 ≤ Q < 500	100	300	100
500 ≤ Q < 1000	80	260	80
1000 ≤ Q < 2000	70	200	70
2000 ≤ Q < 10000	60	180	60
10000 ≤ Q	40	150	40

FONTE: Produzida pela autora com base nos dados de FEPAM (2019) (SEMACE, 2017)

Ainda segundo a portaria, deve-se realizar monitoramento do sistema de destinação observando periodicamente o volume aplicado, pH, condutividade elétrica, micro e macro nutrientes, contaminantes, e a qualidade do efluente, além da qualidade e nível da água subterrânea em caso de disposição em bacias ou valas de infiltração. Ainda neste último caso deve ser analisada a taxa de infiltração, e quantidade total infiltrada (FEPAM, 2019).

2.2 OS ASPECTOS AMBIENTAIS DO REUSO DE EFLUENTES

A escassez de água, a saturação da capacidade de recuperação dos corpos hídricos após o despejo de efluentes, o crescimento da população, e por consequência aumento da demanda por alimentos, a visibilidade das necessidades e superficialidades do uso de água potável, em conjunto tornam o reuso de águas residuais um atrativo visto que a demanda por água é excessiva, e o uso desse efluente é possível para usos menos restritivos (BIZARI e CARDOSO, 2016; CUNHA et al., 2011; SANTOS et al., 2015).

O efluente tratado, doméstico ou industrial, pode ser usado para fins urbanos potáveis ou não. O uso para fins potáveis deve ser realizado preferencialmente com efluentes domésticos, visto que a identificação adequada de compostos de alto risco em efluentes líquidos industriais é improvável (HESPANHOL, 2002). Além disso é recomendado o uso apenas para os chamados sistemas de reuso indireto, ou seja, previamente à captação para redistribuição houve diluição do esgoto tratado em corpos hídricos, com detenção longa. O reuso indireto implica que o corpo hídrico onde o efluente será despejado seja um receptor não poluído. A priori, quando há, ou houve, despejo de efluentes industriais no corpo, este é desclassificado no uso para fins potáveis. Quando existe o desejo de reutilizar o efluente tratado em fins potáveis, para garantia da segurança permanente ao consumidor é necessário empregar

sistemas de tratamento mais eficientes, isto é, com etapas de tratamento suplementares.

A República da Namíbia, por exemplo, realiza coleta de esgoto doméstico para reuso para fins potáveis. Para isso, além do tratamento convencional do efluente doméstico o país realiza no tratamento a dosagem de carvão ativado em pó, pré-ozonização, coagulação e floculação aprimoradas, flotação de ar dissolvido, filtração de areia dupla, ozonização principal, filtração em carvão ativado biológico, adsorção de carvão ativado granular em dois estágios, ultrafiltração, desinfecção e estabilização. Após o tratamento é realizada a contenção do efluente tratado em aquíferos subterrâneos por um período prolongado, e após o tempo de detenção determinado é então realizado o abastecimento público (JACQUEMET et al., 2007).

O uso de efluentes tratados quando com o foco em fins não potáveis pode ser aplicado em irrigação de áreas ajardinadas, áreas verdes públicas como jardins, e gramados, pode também ser usada para controle de poeira, sistemas decorativos aquáticos, descarga sanitária de banheiros públicos ou edifícios comerciais e industriais, lavagens de locomotivas públicas, e para reserva contra incêndios (RODRIGUES, 2005)

Para o reuso com fins não potáveis em meio urbano é mais recomendado o esgoto doméstico, pois envolve menor risco e é mais acessível. Apesar de ainda haver elevado custo com, por exemplo, sistemas duplos de distribuição, e risco com conexão cruzada. Esses fatores negativos podem ser compensados pelo benefício da diminuição do consumo de águas potáveis, diminuindo a necessidade da procura por novos meios de abastecimento público (CUNHA et al., 2011)

É possível utilizar efluentes tratados também na indústria, diretamente em processos ou não. A chamada água de utilidade, efluente proveniente de tratamento secundário é uma opção para as indústrias com o atrativo de menor valor do que compra de água limpa. A água de utilidade pode ser empregada no resfriamento de torres, essa opção não exige do efluente que possua níveis elevados de tratamento. Pode ser feito o reuso também em caldeiras, em construção civil (incluindo na preparação do concreto, por exemplo) e diretamente em processos industriais, na produção de vapor, manufatura de papel e papelão, em processos da indústria têxtil, petroquímica, curtume, outros. Para implementação do reuso em processos como os citados anteriormente há necessidade de maior investimento financeiro, e de um tratamento mais eficaz para o efluente, de acordo com o padrão exigido por cada

atividade. A indústria pode ainda reutilizar dentro de suas próprias dependências seu efluente (HESPANHOL, 2002).

Outra opção para o efluente tratado é a inserção em aquíferos. Além de aumentar a disponibilidade de água ainda promove o tratamento adicional de efluentes, através da capacidade natural de biodegradação e filtração dos solos, como cita Silva (2011). O tratamento do efluente por meio da recarga de aquíferos ocorre quando a recarga é feita por instalações de infiltração superficiais, permitindo a passagem do efluente no solo. A tecnologia chamada SAT, Soil-Aquifer Treatment, proporciona um tratamento elevado do efluente, os investimentos nesse sistema são em média 40% menores do que sistema convencionais de tratamento. Além disso, o SAT promove remoção de metais pesados, organismos patogênicos, nitrato, amônia, fosfato, micropoluentes, sólidos suspensos e carbono orgânico dissolvido (SHARMA e KENNEDY, 2017). Outra alternativa para recarga seria por poços de injeção, ligando a camada insaturada diretamente à bacia.

Além disso, em áreas onde ocorre constante bombeamento de aquíferos é comum a ocorrência de subsidência do solo, ou seja, o afundamento do solo por perda de suporte. A inserção de efluente em aquíferos nessas áreas previne esse problema (SILVA, 2011).

2.2.1 Reuso de efluentes na agricultura

A demanda por água potável do setor agrícola de maneira sustentável não poderá ser mantida, afirma o autor Hespanhol em trabalho sobre reuso de águas tratadas no Brasil. Dessa forma cada vez mais tem sido empregado o uso de efluentes tratados para irrigação de culturas. Além de diminuir a necessidade por água potável o uso de efluentes tratados, por sua alta concentração de nutrientes e matéria orgânica, diminui a necessidade de fertilizantes sobre as culturas (SANTOS et al., 2015). Ademais, a infiltração do efluente através do solo, alcançando lençóis promove a preservação dos mesmos, como citado anteriormente, por diminuir os efeitos da subsidência do terreno em locais onde os lençóis são frequentemente utilizados para bombeamento de água.

Recomenda-se o uso de efluentes domésticos para suprir a demanda da agricultura pois pode haver acúmulo de contaminantes químicos no solo, e outros compostos, que geralmente estão em maior quantidades nos efluentes industriais

(HESPANHOL, 2002). Há ainda outra fragilidade no reuso de efluentes na agricultura, a possibilidade de proliferação de vetores transmissores de doenças graças a aplicação por tempo prolongado (MENEZES, 2019). Dessa forma é necessária uma logística de aplicação com técnicas de controle de vetores.

Prevendo garantia a saúde dos grupos que venham a possuir vulnerabilidade à saúde devido a aplicação de efluentes na agricultura, propõe-se aplicação e monitoramento de aspectos técnicos, como os que seguem. É sugerido que o tratamento de efluentes para aplicação na agricultura siga critérios diferentes do tratamento para descarga em corpos hídricos, visto que é benéfico para os solos, nesse caso, que o efluente possua concentração de matéria orgânica, nutrientes e micronutrientes. Além disso é importante observar a Seleção e Restrição de Culturas, o controle a exposição humana, e nesse caso os métodos para controle da segurança dependem do grupo de risco ao qual se trata, consumidores ou trabalhadores. O último fator importante na garantia a saúde é a técnica de irrigação a ser aplicada (HESPANHOL, 2002).

2.3 EFLUENTES APLICADOS AO SOLO NO BRASIL

2.3.1 Dejetos líquidos bovinos

No estudo de Silva (2017) foi aplicado dejetos líquidos bovinos (DLB) num sistema de plantio direto para avaliar os efeitos dessa aplicação sobre a emissão de nitrogênio amoniacal. Entre as interfaces experimentais houve aplicação do dejetos na superfície do solo, com e sem combinação com dicianodiamida, que é um inibidor de nitrificação amoniacal. E também injeção do dejetos, novamente com ou sem combinação com a dicianodiamida. O dejetos usado no estudo tem origem de vacas em lactação, e é constituído de fezes, urina, restos de alimentos e água de lavagem.

Os dejetos líquidos bovinos possuem um aporte considerável de nutrientes em sua composição, principalmente o nitrogênio. É observado que, de forma negativa, o N amoniacal disponível no solo a partir do dejetos, pode ser perdido para a atmosfera, resultado das transformações que sofre por microrganismos no solo. Pode haver ainda perda em forma de nitrato, e nesse caso há risco de contaminação de mananciais e rios (LIU et al., 2014). Nas culturas gramíneas, onde existe uma alta demanda de N, essas vulnerabilidades são bastante observadas (SILVA, et al., 2016).

O estudo mostrou que a injeção do dejetos bovino diminuí a emissão de amônia em ambos os solos testados, os quais eram um solo argiloso, que possui baixa permeabilidade e é de difícil desagregação. E um Latossolo, caracterizado por baixa capacidade de troca de cátions, alto teor de argila, pouca diferenciação em profundidade, e geralmente pouco férteis (IAC, 2020). Outra vantagem foi o aumento da eficiência do uso de N provocado pela injeção do dejetos. O estudo não tratou de relações entre o solo e a aplicação do dejetos, ou das interações entre os dois (SILVA, 2017).

2.3.2 Efluente têxtil

O tratamento do efluente de indústria têxtil gera um rejeito semissólido chamado lodo têxtil. Após tratamento esse lodo é chamado de biossólido. Esse resíduo tem composição variável, mas em geral o lodo têxtil possui alto teor de matéria orgânica, micronutrientes, nitrogênio, fósforo, sódio e potássio (ARAÚJO et al., 2005; PRADO e NATALE, 2005)

Autores divergem quanto a eficiência desse lodo no uso agrícola. Pelissari (2009) aponta que pode haver equilíbrio no uso dessa fonte. Em seu experimento, quando houve semeadura de eucalipto num substrato preparado somente com biossólido os efeitos sobre as mudas foram negativos. Para um substrato 75% de biossólido e 25% substrato comercial os resultados foram positivos dentro dos parâmetros estabelecidos pelo autor. Araújo (2005) em experimentos sobre aplicação de lodo têxtil em plântulas de soja e trigo observou efeitos negativos como diminuição da altura da planta e do comprimento radicular. Ambos, segundo cita o autor, são indicativos de toxidez nas plantas, ocorrida a partir de metais pesados presentes na composição do lodo têxtil. É interessante observar que nas análises químicas do lodo deste estudo os teores de cobre e zinco estavam abaixo dos limites máximos estabelecidos pela CETESB (SÃO PAULO., 1999), porém o lodo foi diluído. O fato de o lodo têxtil estar em solução propiciou máxima disponibilidade de Cu e Zn para as plantas.

Prado e Natale (2005) avaliaram o uso de lodo industrial têxtil em maracujazeiros. Na análise do biossólido utilizado nestes ensaios verificou-se a presença de fenóis acima de 10 mg kg⁻¹. A maior dose aplicada do lodo (30 g por vaso) provocou a morte das mudas do estudo, apontou-se o sódio como responsável

pela toxidez. Para outras concentrações os efeitos desse resíduo foram positivos, houve a correção da acidez do solo, e fornecimento de zinco e manganês, e aumento do teor de micronutrientes no solo. Em relação as plantas, houve efeitos positivos apenas para a menor dose aplicada de lodo (10 g por vaso), apontado como possível reação a neutralização da acidez do solo. Os autores citam ainda que os efeitos negativos nas plantas podem ser resultado do Na e K presente no lodo. Esse teor salino provavelmente provocou aumento da condutividade elétrica do solo, requerendo maior energia das raízes para absorção da água presente (PRADO e NATALE, 2005).

Em estudo realizado sobre a eficiência na aplicação de alguns efluentes foi exposta situação legal do estado de Santa Catarina, onde o Instituto do Meio Ambiente - IMA, na instrução normativa Nº 11 determina que a quantidade máxima de dejetos para a utilização em lavouras deve ser $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. As análises químicas feitas no efluente têxtil mostraram que ele possui valores baixos de nutrientes, e nesse caso somente a aplicação do lodo têxtil para suprir as necessidades de algumas culturas excederia o máximo permitido pelo órgão regulador. Por exemplo, para um solo com teor médio de potássio deve-se aplicar $250 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de lodo têxtil para atender as necessidades do solo. Em relação ao fósforo, no estudo esse efluente não apresentou teor suficiente para suprir a necessidade de solos que possuam valores pequenos de P. Dessa forma recomendou-se a mistura desse dejetos com outros efluentes para complementar os teores de nutrientes, ou aplicação do lodo e adubação química (AGUIDA et al., 2017).

Apesar das considerações os artigos encontrados possuem foco no desenvolvimento das plantas cultivadas em substratos de lodo têxtil. Não na dinâmica do efluente no solo, visto que o mais utilizado é a massa semissólida proveniente desse setor industrial (biossólido), e não o efluente líquido, evidenciando a necessidade de estudos da aplicação do efluente em solos. Além disso nota-se que o efluente ou o próprio lodo têxtil possui composição variável conforme a indústria.

2.3.3 Efluente Laticínios

O efluente gerado em indústrias de laticínios possui altos teores de gorduras, matéria orgânica, sais, sólidos suspensos e nutrientes (FIGUEIREDO et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2020). Um experimento fez a análise química da aplicação de

efluente laticínio em solos com cultivo de capim-mombaça. O principal objetivo foi observar o índice de saturação por sódio e a lixiviação de compostos do efluente no solo, pois esse efluente possui elevado teor de sódio, que pode impactar negativamente na disponibilidade de nutrientes do solo (TEIXEIRA, 2020).

A análise do efluente utilizado no experimento de Teixeira (2020) mostrou que ele possuiu potencial para aplicação como fertilizante. Caracterizou-se o efluente como rico em micro e macronutrientes como por exemplo cálcio, magnésio, fósforo e potássio.

Avaliando-se o fator de retardamento de Ca, Mg, K e P observou-se que há baixa mobilidade dos íons no solo, e elevada interação do solo com soluto, a exceção do magnésio no efluente bruto cujo valor do fator de retardamento divergiu do comportamento das demais substâncias. Os resultados de análises de coeficiente dispersivo-difusivo mostraram que a preferência de interação foi $K > Ca > Na > Mg$, e nesse caso ocorre o risco de gerar um solo salino com acúmulo de K nas camadas superiores, e sódio nas camadas inferiores, podendo contaminar lençóis freáticos devido a lixiviação do Na, que demonstrou elevada capacidade de mobilidade no solo, para o tipo estudado, um latossolo vermelho amarelo (TEIXEIRA, 2020).

O efluente estudado pode ser usado com taxa de aplicação de 600 kg ha^{-1} , valor quatro vezes maior do que o valor máximo sugerido por Larcher (2006), que proporciona maior produtividade de matéria seca sem riscos de contaminação a cultura e ao solo.

2.3.4 Efluente da Produção de Papel

Um dos principais processos químicos na produção de papel é o chamado Kraft, nele são gerados lama de cal, cinzas, lodo celulósico e dregs/grits. Sendo o último um resíduo próprio desse processo, resultado da mistura dos dregs e grits. O dregs é gerado no processo de queima do chamado licor negro, para recuperação de reagentes químicos. O grits é um material insolúvel rico em Ca, Mg, K, Na e Al. As possíveis destinações e aproveitamentos desse conjunto que gera o resíduo da indústria de celulose e papel vem sendo estudado por diversos autores (COSTA et. al., 2009; HARRISON et. al., 2003; MACIEL et. al., 2015; MEDEIROS, 2008). Uma das possíveis soluções é a sua aplicação em solos.

Harrison et. al. (2003) publicou sobre o benefício desse rejeito para aumento de produtividade de madeira e melhoria no solo. A interação do resíduo do processo de produção de papel com o solo mostrou tanto em laboratório como em campo o aumento do pH, aumento na saturação por bases, e redução do alumínio. Porém divergiram quanto ao teor de sódio. Em laboratório não houve alteração do teor de Na, enquanto observou-se em campo aumento do teor de sódio (COSTA et. al., 2009; MACIEL et. al., 2015; MEDEIROS, 2008). O aumento dos valores de Na são prejudiciais pois podem provocar dispersão do solo afetando sua estrutura.

Medeiros (2008) e Maeda & Bognola (2013) observaram em seus experimentos em campo um aumento na relação de cálcio e magnésio, para um Cambissolo Húmico e para um Neossolo Regolítico, respectivamente. Onde ambos são prejudiciais tanto ao solo quanto as plantas. Ainda há divergências quanto ao uso de resíduos da extração de celulose na agricultura, pois podem provocar alterações negativas na qualidade do solo, porém reduzem a necessidade de adubos inorgânicos e favorecem o desenvolvimento de culturas (MACIEL et. al., 2015).

Maciel et. al (2015) em estudo de laboratório da aplicação de resíduos de extração de celulosas em dois tipos de solos diferentes observou que é possível utilizar esse rejeito como aporte de nutrientes, e assim a utilização de fertilizantes. O estudo demonstrou ainda que houve aumento da matéria orgânica dos solos principalmente no tratamento das amostras com mistura de dregs/grifs com lama de cal. O aumento da MO propicia maior capacidade de retenção de água, formação de agregados estáveis e diminui a lixiviação de nutrientes minerais. No estudo essa mesma composição mostrou um aumento da razão C/N, desfavorecendo algumas culturas, pois pode provocar imobilização do nitrogênio que pode ocasionar na deficiência nutricional da planta.

Quanto ao potássio o estudo mostrou diminuição do teor de elemento nos solos, interpretado como capacidade da perda desse íon por lixiviação, e possibilidade de ser transportado para profundidades altas. Entre as composições

utilizadas no estudo de Maciel (2015), os testes feitos com aplicação das cinzas apresentaram maiores concentrações de sódio. Aliado a isso, as cinzas possuem alta razão C/N, que favorece a lenta decomposição da MO, resultando na redução da lixiviação de K. Quanto ao movimento do soluto no solo, importante para o equilíbrio dos nutrientes do solo, as análises temporais realizadas a cada dez dias apontaram para lixiviação dos íons, com repetição de valores máximos de

concentração dos íons a cada ciclo de 30 dias, e valores mínimos dos mesmos a cada ciclo de 40 dias, o autor aponta como causa o excesso de água nas colunas de solo.

2.3.5 Efluente de Galvanização

O efluente líquido de algumas empresas que realizam a galvanização na região metropolitana de Belo Horizonte foi analisado em LADEIRA e PEREIRA (2008). Constatou-se que o efluente do processo de galvanização é rico em ferro e zinco, além disso o elemento cromo apareceu em todos os efluentes analisados mesmo que na condição de elemento traço. O Cr é considerado um elemento tóxico. Segundo literatura a periculosidade do cromo depende do seu estágio de oxidação. As espécies trivalentes apresentam baixa solubilidade, e sua fração solúvel, em concentração traço pode ser considerada benéfica aos seres humanos e animais. Já o Cr(VI) é altamente tóxico e cancerígeno, além de possuir alta solubilidade, e nesse caso pode ser transportado com facilidade pelo solo, aumentando o risco de contaminações de lençóis freáticos (MARONEZI et al., 2019).

Alguns estudos indicam que as próprias condições dos solos são capazes de gerar equilíbrio entre o cromo e o meio. Porém são dependentes do tipo de solo. Dessa forma é necessário estudar mais a interação entre o solo e o cromo (PUGAS, 2007., FRANCO, 2008). Sobre o zinco, Araújo (2012) em análises do composto em 12 tipos classes diferentes de solos afirma que a adsorção não específica exerce papel importante sobre a retenção do Zn nos solos, e comparado ao chumbo e ao cobre esse elemento possui maior mobilidade e disponibilidade. A solubilidade do ferro no solo é controlada pelo pH do meio, e nesse caso em solos ácidos é favorecida a disponibilidade desse elemento, já para solos alcalinos é prejudicada (BARBOSA FILHO et al., 1994).

2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

2.4.1 Densidade do Solo

A densidade do solo é um importante indicador da compactação de um solo. Esse parâmetro é considerado de comportamento inverso a condutividade hidráulica, porosidade total e macroporosidade. Ao mesmo tempo, favorece a microporosidade, sendo observado que quanto maior a densidade do solo, mais propenso o solo é de possuir valor de microporos que se sobressair frente a porosidade total e macroporosidade (LIMA et al., 2007).

2.4.2 Porosidade

A porosidade é importante para entender o movimento de água e demais fluídos nos solos, a distribuição dos poros condiciona o comportamento físico-hídrico. De acordo com a distribuição dos tamanhos dos poros, pode haver restrição do fluxo de líquidos no solo. A porosidade total é tratada como a porção de um determinado volume do solo que pode ser ocupada por gases ou fluídos (EMBRAPA, 2017). Entre os poros, seu diâmetro o diferencia em micro e macroporos. Sendo os microporos responsáveis pela retenção de água no solo, e os macroporos (que possuam diâmetro maior que 0,05 mm) são responsáveis pela drenagem e aeração (RIBEIRO, 2017).

2.4.3 Condutividade Hidráulica

O entendimento do transporte de fluídos no solo, e sua distribuição tem grande importância no manejo de culturas devido a sua influência na irrigação, drenagem e deflúvio superficial (SCHOSSLER et al., 2013).

A condutividade hidráulica é a propriedade que representa a facilidade de um fluído ser transportado através do solo (MESQUITA; MORAES. 2004). O máximo valor de condutividade hidráulica é chamado de condutividade hidráulica saturada. A condutividade é dependente da estrutura do solo, principalmente distribuição, continuidade e forma de poros.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS DE ESTUDO

Com base na pesquisa de literatura com foco em efluentes utilizados na irrigação, foram pesquisadas empresas dos estados do Paraná e Santa Catarina que produzissem efluentes iguais ou semelhantes aos com possível potencial, ou já aplicados ao solo. Após contato com as empresas, foram disponibilizados 5 efluentes, sendo 4 de empresas de atividades distintas, e 1 de empresa de tratamento de efluentes industriais. Também foram feitos testes com dejetos líquidos bovinos, como forma de ser uma testemunha positiva ao experimento, já que esse efluente é comumente utilizado para a adubação de culturas agrícolas. Os efluentes foram nomeados de acordo com a sua atividade conforme Tabela 3.

TABELA 3 – NOMENCLATURA ASSOCIADA AOS EFLUENTES UTILIZADOS RELACIONADO AO SEU RAMO INDUSTRIAL

Nomenclatura	Atividade da Indústria
Estação de Tratamento	Gestão ambiental – tratamento, destinação e valorização de resíduos.
Laticínios	Setor alimentício – fabricação e comércio de produtos laticínios e derivados de cacau e chocolate, entre outros.
Metais	Indústria de galvanização
Têxtil	Processos produtivos da indústria têxtil – malharia, tinturaria, estamparia, corte, costura e expedição.
Tintas	Fabricação de produtos de papel com foco no revestimento de papéis com tintas.

FONTE: A autora (2021)

De forma simplificada o efluente Estação de Tratamento é o resultado de diversos processos que começam em lagoa de equalização, onde são misturados chorume classe I e II, e efluentes externos. Após essa mistura sofre tratamento primário físico-químico, com tanque de alcalinização e decantadores primários. Esse processo gera lodo e efluente, que é o produto de interesse do estudo. O efluente é enviado para lagoa de stripping, processo que realiza a remoção de nitrogênio amoniacal, trata-se de uma lagoa com diversos aeradores, e após o efluente é direcionado para uma torre de air stripping, em seguida o efluente tem o pH corrigido em tanque de correção, para atingir o pH neutro. Depois desse processo, o efluente passa por reator e lagoa aeróbia biológica, e depois passa por decantor secundário, separando novamente lodo e efluente. O efluente resultante desse processo é então

direcionada a filtros de areia, e microfiltro, de 25 até 5 micras, e depois sofre nanofiltração, sua última etapa, e de onde foi retirado o produto utilizado no estudo.

Sobre o tratamento sofrido no efluente Laticínio a pesquisa diretamente com o fornecedor do produto não retornou respostas. Em pesquisa literária notou-se que usualmente utiliza-se na indústria de laticínios o tratamento simples em lagoas facultativas com posterior envio do efluente para a companhia responsável pelo saneamento básico (GOMES et al., 2017; POKRYWIECKI et al., 2013).

O efluente dito metais, proveniente de indústria de galvanização, durante seu tratamento passa primeiramente por tanque de equalização, em seguida sofre oxidação dos cianetos e redução dos cromatos. Então é enviado para o processo de precipitação química dos metais, ajuste do pH e então é enviado para a decantação. Após a decantação são separados o lodo e o efluente, o qual foi o produto coletado para uso nesse estudo.

O efluente têxtil, conforme respondido pelo responsável pelas seguintes etapas de tratamento: a água residuária é direcionada para um Tanque de equalização, após passa pelo tanque de aeração, após sofre processo biológico, e então é realizada dosagem com polímero e descolorante. Por último, o efluente passa por processo de decantação do lodo.

O efluente tintas é o resultado do tratamento que começa por etapa físico-químico com cloreto férrico, hidróxido de sódio e polímero aniônico. Após o clarificado é enviado para um reator de batelada sequencial com lodo ativado, nessa etapa é inserido também o efluente sanitário. Em seguida a água clarificado passa por um filtro de areia e na sequência por um filtro de carvão ativado. O produto do filtro de carvão ativado foi o coletado para o estudo.

O dejetos líquido bovino (DLB) obtido para o estudo é proveniente de uma unidade de produção de leite. O dejetos líquido bovino obtido para o estudo é proveniente de uma unidade de produção de leite. O início da separação do efluente se dá pela passagem dos dejetos por duas peneiras visando separação de dejetos sólidos dos líquidos. O dejetos líquido é direcionado então para tratamento biológico que é realizado por passagem em lagoa anaeróbia em série, e lagoa aeróbia em série, e então é enviada para lago de polimento (DE OLIVEIRA, 1993).

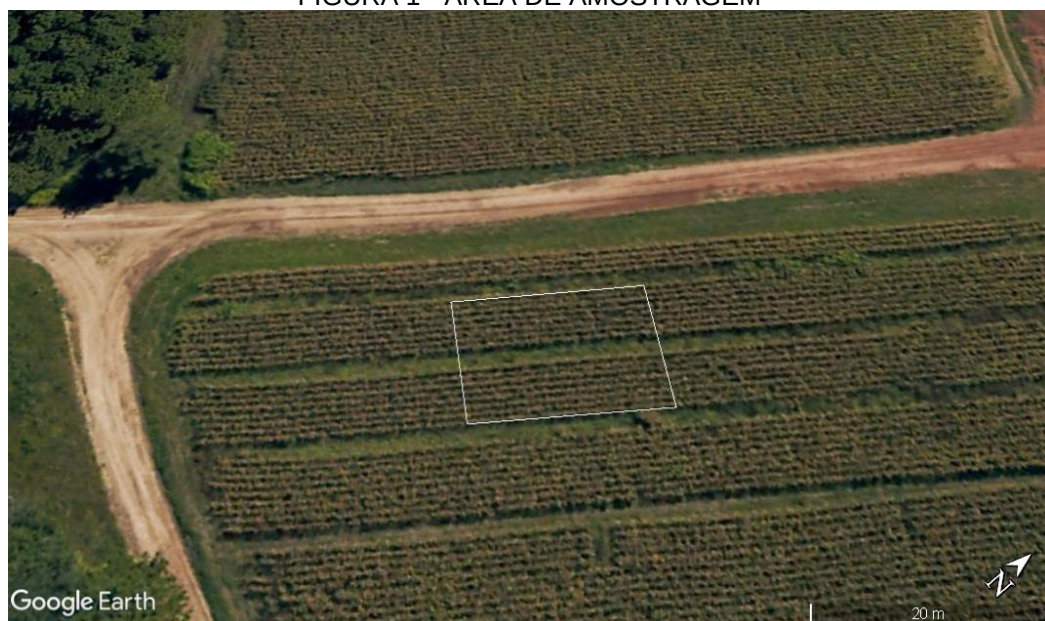
Para o futuro, será realizado o método EPA 3051 (1994), que consiste na digestão da amostra pelo aquecimento em forno microondas. Uma quantidade de amostra de solo seco deformada é dividida em frascos de digestão e então é

adicionada à amostra ácido nítrico concentrado. As amostras são levadas para digestão no forno por 10 minutos. Com água, a solução é transferida para balões volumétricos e filtrada. Então por espectrômetro, de acordo com as linhas espectrais sugeridas em RAIJ et al. (2001) para identificação dos elementos químicos conforme interesse. O atraso destas análises, previstas no Projeto de TCC foram devido à sobrecarga de trabalho do laboratório e laboratorista responsável por tais análises, devido às restrições impostas pela pandemia.

3.2 COLETA E PREPARO DE AMOSTRAS DE SOLO PARA TESTES DE CONDUTIVIDADE

Foram coletadas amostras de solo indeformadas, na Fazenda Experimental do Canguiri, localizada no município de Pinhais, no estado do Paraná. A Fazenda é uma das quatro que compõe o Centro de Estações Experimentais da Universidade Federal do Paraná. As amostras foram recolhidas em uma área de dimensão aproximada 13×20 m, localizada em $25^{\circ}23'28.51''$ S de latitude, e $49^{\circ} 7'31.23''$ W de longitude (FIGURA 1), recolheu-se 80 amostras indeformadas. As distâncias entre os locais de amostragem foram espaçadas aleatoriamente, dentro da área escolhida, buscando distinção entre as propriedades físicas do solo

FIGURA 1 - ÁREA DE AMOSTRAGEM



FONTE: Google Earth Pro. Escala 1:9000.

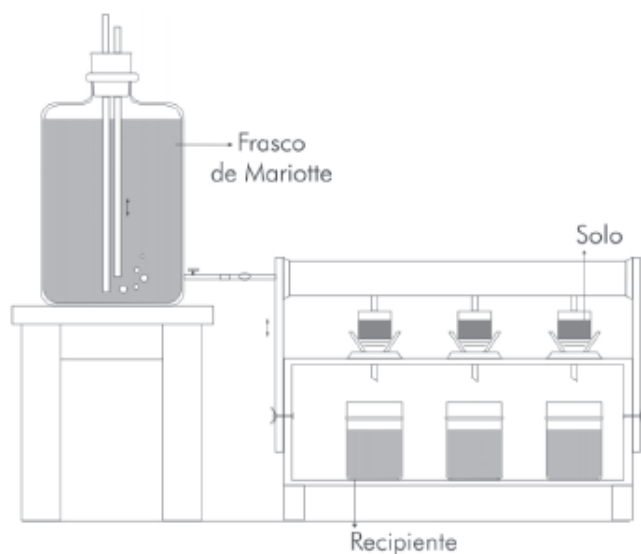
As amostras foram coletadas em uma camada de solo com até 10 cm de profundidade usando amostrador de Uhland e acondicionadas em anéis volumétricos de aproximadamente 55 mm de diâmetro e 30 mm de altura. as amostras foram envoltos em filme plástico para evitar a perda de umidade. Com o intuito de caracterizar o solo da área uma quantidade de solo deformada também foi amostrada. A caracterização química do solo indeformado resultou em pH de 6,47, teor de cálcio igual $14,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e magnésio de $5,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, potássio de $0,76 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, fósforo igual a $12,71 \text{ mg dm}^{-3}$, carbono orgânico de $46,4 \text{ mg dm}^{-3}$. Além disso não foi detectado alumínio na amostra. O local de amostragem tem classe textural argilosa e foi classificado como um Gleissolo Melânico Distrófico (Favaretto et al., s.d.).

Após a coleta, em laboratório, as amostras foram preparadas retirando-se o excesso de solo do anel, com o propósito de obter o mesmo volume em todas as amostras. Além disso pedaços de tecido fino foram colocados em uma das bases de cada amostra, para evitar a perda de partículas nos ensaios aos quais serão submetidas. Cada prova foi então identificada por numeração. Nesse processo algumas das amostras foram inviabilizadas, devido a perda excessiva de solo no anel, ou durante o processo de limpeza foram danificadas, além disso algumas das amostras desenvolveram raízes, e foram descartadas. Totalizando ao final da limpeza 54 amostras.

3.3 MESA DESENVOLVIMENTO DE PERMEAMETRO DE CARGA PERMANENTE

Foi reproduzido o permeâmetro proposto por Marques et al. (2008), onde o princípio foi basicamente manter uma carga hidráulica constante, utilizando-se um frasco de Mariotte, e medindo o volume da solução drenado em função do tempo, isto é, a vazão (Q).

FIGURA 2 - DESENHO ESQUEMÁTICO DE PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE.



FONTE: Marques et al. (2008)

Para reprodução do Frasco de Mariotte foi utilizado um galão de armazenamento de água de 20 L, um tubo de acrílico com 11 mm de diâmetro interno, 15 mm de diâmetro externo, e 500 mm de comprimento. Uma rolha, a qual foi perfurada para passagem do tubo de acrílico conforme se observa na figura 3. A escolha do tamanho da rolha foi feita para que houvesse vedação completa da abertura superior do galão impedindo vazamento de ar ou fluídos.

Um furo foi feito a aproximadamente 8cm da base do galão, para saída de líquidos. Nesse furo foi encaixado uma mangueira cristal transparente 1/4" x 1,5 mm, e após a mangueira um registro de união dentada de 4/7mm, que possibilitou abrir e fechar a saída inferior do galão. O furo inferior e o registro foram vedados usando epóxi bi-componente (durepoxi®).

A mangueira foi estendida após o registro, e foi fixada em uma base de madeira de 110 cm de comprimento, usando abraçadeiras de lacre. A base de madeira foi suportada por uma estrutura simples de cano PVC, que possibilitava manter a mangueira estirada acima das amostras. Foram inseridos ao longo do comprimento da mangueira 5 conectores farpados modelo Tee Cruz com 4/7mm, e na saída desses conectores, um pedaço de mangueira, foi conectado a um Equipo simples, usualmente utilizado em procedimentos de saúde, como aplicação de soros.

O equipo foi ajustado para manter a pinça rolete, e assim regular a vazão de líquidos, mas foi retirada a câmara de gotejamento, pois ao longo dos testes prévios do equipamento, observou-se que essa câmara promovia a passagem de ar para

dentro do sistema, o que impedia o funcionamento proposto para o Permeâmetro de Carga Permanente. Além disso, a câmara possui um filtro de partículas de 15 μm , que impedia a passagem de alguns efluentes devido a sua densidade, e a pressão máxima obtida pelo sistema. A ponta perfurante também foi retirada, de forma que o líquido era expelido diretamente do tubo de 1,5 mm do equipo. Todas as conexões foram vedadas com veda-rosca e produto epóxi bi-componente (durepoxi®).

Também foi feita uma base de madeira para posicionamento das amostras. A base possui 25_cm de altura e 85_cm de comprimento e 15_cm de largura. E foram feitos 5 buracos de 5,4_cm de diâmetro, espaçados entre si 12_cm, e com 5_cm das pontas. Os furos foram distribuídos igualmente ao longo da base.

Durante os ensaios o permeâmetro foi utilizado para água, água deionizada e diversos efluentes. A cada troca de líquidos, a saída final da mangueira era aberta e deixava-se circular o líquido pelo sistema até a saída por alguns minutos. Após esse tempo a última saída era fechada, e em cada um dos conta-gotas o mesmo procedimento era realizado. Isso foi realizado visando que não houvesse mistura do líquido usado durante o último ensaio, com o líquido do próximo a ser realizado na sequência.

FIGURA 3 – REPRODUÇÃO DO FRASCO DE MARIOTTE DO EXPERIMENTO.



FONTE: imagem da autora.

FIGURA 4 – PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE



FONTE: Imagem da autora.

3.4 DESENVOLVIMENTO DE MESA DE TENSÃO

Durante a execução do projeto desenvolveu-se em paralelo ao Permeâmetro de Carga Constante uma Mesa de Tensão de baixo custo para a determinação da retenção de água no solo até 100 hPa, conforme Lima; Silva (2008).

Para montagem da mesa foi utilizada uma caixa plástica medindo 35 cm de largura, 25 cm de altura e 25 cm de comprimento, com tampa. A caixa foi perfurada em suas duas extremidades, para inserção de mangueira de borracha rígida com 6 mm de diâmetro (Figura 5), as perfurações foram vedadas com veda-rosca e epóxi bi-componente. Na mangueira foram feitos diversos furos pequenos para realizar a drenagem das amostras. Além disso, a fim de evitar entupimento dos furos, a mangueira foi revestida com tecido do tipo voil.

Utilizou-se aproximadamente 20 kg de areia para o preenchimento da mesa. A areia foi uma mistura de areia de construção com dióxido de silício industrial de diferentes granulometrias, todas menores que a areia de construção. A areia de construção, antes de ser utilizada na mesa de tensão, foi lavada e peneirada em

peneira de 106 μm . A camada de areia foi acondicionada na mesa de tensão até a altura de 5 cm acima do dreno. Sob a areia foi posicionado um pedaço de Manta de Bedin, de maneira que cobrisse toda a área da mesa, cuja finalidade era evitar o contato direto das amostras de solo com a areia.

O comprimento da mangueira foi escolhido para se projetar para fora da caixa plástica até a abertura superior de um kitassato. Essa vidraria foi utilizada para a função de tubo de drenagem, similar a coluna de vidro graduada proposta por Lima, Silva (2008). Utilizou-se uma rolha para tampar o kitassato, e essa rolha foi perfurada para passagem da mangueira, conectando a passagem da água de dentro da caixa até o kitassato.

Para realizar a calibração da mesa, antes de inserir a mangueira no tubo de drenagem a caixa com areia foi enchida de água deionizada, até três centímetros superiores a altura da areia. Após, a extremidade externa da mangueira foi finalmente inserida no tubo de drenagem. O tubo do kitassato foi então aberto para drenar o excesso de água.

FIGURA 5 – ESQUEMA INTERNO DA MESA DE TENSÃO



FONTE: Imagem da autora.

As amostras, após uso no permeâmetro de carga permanente eram saturadas no líquido de interesse (água ou efluentes), após a confirmação da saturação, eram pesadas e então posicionadas na mesa de tensão para realizar a drenagem completa do saturado. Com as dimensões da caixa foi possível acomodar ao mesmo tempo 10 anéis volumétricos. O kitassato foi posicionado de modo que sua saída estivesse posicionada a 60 cm abaixo do nível da areia, para obter 6 kPa de pressão, que é a tensão que separa macro e microporos (Teixeira et al., 2017).

FIGURA 6: MESA DE TENSÃO



FONTE: Imagem da autora.

3.5 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE

Após o preparo das amostras, definido na seção 3.2, foram iniciados os ensaios de condutividade hidráulica. Para realização do procedimento de condutividade hidráulica utilizou-se como referência o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017).

Primeiramente as amostras foram saturadas em água deionizada, para isso depositou-se as provas em bandejas e uma fina lâmina de água foi depositada nas bandejas, para iniciar a saturação das amostras por ascensão capilar, similarmente ao realizado em GONÇALVES-MADURO et al. (2020). Após 60 minutos, a mesma quantidade de água foi depositada nas bandejas. Após 24 horas mais água foi

colocada nas bandejas, dessa vez gerando uma coluna maior, de até 2 cm de limite de pressão na parte inferior. Essa quantidade foi reposta conforme observava-se a absorção da água nas amostras, mantendo a coluna d'água nas bandejas. Esse processo de reposição da água foi realizado por sete dias.

Após a saturação completa das amostras mediu-se a massa saturada delas. Foi colocado outro anel, nas mesmas dimensões, na parte superior da amostra, dobrando a altura do cilindro. Vedou-se as laterais com fita adesiva. Foram escolhidas aleatoriamente amostras, de cinco em cinco. Essas amostras foram posicionadas nos funis e niveladas usando um nível manual de três bolhas. Com o objetivo de evitar danos a superfície das amostras, filtros de papel recortados no tamanho da área dos cilindros foram colocados logo acima da superfície do solo.

Após o nivelamento, o anel superior à amostra foi completado lentamente com água para confirmar a vedação, observando o fluxo de saída da água da parte inferior das amostras. Caso o fluxo fosse contínuo, ou caso fosse possível observar que a saída da água estava ocorrendo no encontro entre os dois anéis, a vedação dos anéis era refeita, até que o fluxo de saída observado fosse considerado contínuo.

FIGURA 7: AMOSTRAS VEDADAS NO PERMEÂMETRO.



FONTE: A autora (2021).

Após estabelecimento do equilíbrio do fluxo do efluente nas amostras, iniciou-se a medição dos volumes obtidos ao longo do tempo. Foram realizadas medidas dos volumes de efluente após 10 minutos do início da medição, após 20, 30, 40 e 50 minutos. Os volumes de efluente eram captados na saída da amostra em recipientes de 500 mL. E medidos em provetas graduadas de 250 mL.

No primeiro momento as amostras foram saturadas em água e percoladas com os efluentes industriais, água deionizada (Testemunha), ou dejetos líquido bovino, a esse procedimento denominou-se a condutividade de efluentes com o solo saturado por água (K_1). Após a determinação, as amostras foram encaminhadas para a mesa de tensão, a -6 kPa, para drenagem dos macroporos. Na sequência, as mesmas amostras foram saturadas em seu respectivo efluente e percoladas por eles, exceto as amostras percoladas por água deionizada ou DLB, para a determinação da condutividade dos efluentes (K_2). Por último, as amostras saturadas em efluente foram percoladas por água deionizada, objetivando determinar a condutividade hidráulica do solo saturado por efluentes (K_3).

Durante o procedimento para o Dejetos Líquido Bovino percolando nas amostras, devido a percolação ser muito baixa os tempos de medição foram 90 minutos, 180 minutos, 270 minutos, e 360 minutos. Outro ajuste realizado para o processo do DLB foi a medição de volume percolado. Os volumes após os períodos eram muito baixos, impedindo a graduação em proveta. Para definir a quantidade percolada em volume foi realizada regra de três.

Pesou-se em balança de precisão a quantidade de 100 mL e pesaram-se cada uma das quantidades capitadas das amostras a cada um dos tempos. A partir de regra de três simples obteve-se o volume percolado em cada uma das amostras.

Para o cálculo das condutividades (K_1 , K_2 e K_3), foi utilizada a Lei de Darcy (EMBRAPA, 2017). A condutividade (K) é calculada usando valores de volume de percolado (Q), tempo de percolação (t), altura do bloco de solo (L), altura do bloco de solo e do cilindro superior (H) e área do cilindro (A). Aos valores de condutividade foram obtidos em mm h^{-1} .

$$k = \frac{Q \cdot L}{H \cdot A \cdot t} \quad (1)$$

3.6 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

Após a determinação dos volumes percolados, e a condutividade hidráulica para cada um dos três cenários testados focou-se na determinação dos valores de densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade das amostras.

Após o uso das amostras no permeâmetro de carga permanente, as mesmas foram saturadas em água, efluente ou dejetos líquido bovino, conforme seu uso anterior no permeâmetro. Considerou-se que as amostras estavam saturadas quando foi possível observar que o nível da coluna de água/efluente não havia baixado após um período de 24 h. Então, as massas das amostras foram medidas, dessa forma obteve-se a massa de solo saturada (M_{ssat}).

A seguir as amostras foram colocadas na mesa de tensão, sob uma pressão de 6 kPa. Quando se observou que não havia mais gotejamento do tubo de drenagem da mesa de tensão por um período de 24 h (geralmente ocorreu após 4 dias), as amostras foram pesadas, obtendo-se assim a massa de solo úmido (M_{su}). As mesmas amostras foram levadas para estufa, por 36 h, a 50 °C, e novamente pesadas, dessa vez obtendo a informação da massa de solo seco a 50 °C (M_{ss}).

Para cálculo da porosidade total foi utilizada a equação 2, conforme Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017), onde a porosidade total é obtida da subtração entre a massa de solo saturado e a massa de solo seco, e então racionalizado pelo volume da amostra de solo.

$$P_t = \frac{M_{ssat} - M_{ss}}{v} \quad (2)$$

Para determinação da microporosidade aplicou-se a equação 3, utilizando essas informações, e o volume (v). das amostras, foi possível determinar a microporosidade como na fórmula indicada pela EMBRAPA (2017).

$$M_i = \frac{M_{su} - M_{ss}}{v} \quad (3)$$

Em posse dos valores de porosidade total e microporosidade, a macroporosidade se obtém de maneira simples, visto que por definição a porosidade total é a soma de micro e macroporos.

$$M_a = P_t - M_i \quad (4)$$

Além das propriedades já descritas, com as informações levantadas durante o experimento foi definida a densidade do solo (D_s).

$$D_s = \frac{M_{ss}}{v} \quad (5)$$

3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos ao modelo estatístico de análise de variância (ANOVA) de experimento em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. As pressuposições de normalidade dos resíduos e homoscedasticidade foram verificadas através dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett. Após a verificação das pressuposições, o teste F foi aplicado, e quando necessário, o teste de Tukey usado para comparações múltiplas entre os efluentes. Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software R, versão 4.1.1 (R CORE TEAM, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

Por meio do software R foi calculado o quadrado médio (QM) e a probabilidade (p) de cada uma das propriedades. Além disso o script para R foi escrito de modo a fornecer também o coeficiente de variação (CV) do conjunto de dados de cada uma das propriedades. O coeficiente de variação demonstra a precisão de um experimento (ARAÚJO, 2015), sendo a maior porcentagem de CV observada a da macroporosidade, e a menor a da microporosidade.

A diferença estatística dos parâmetros estudados foi indicada pela probabilidade. Caso a probabilidade observada fosse menor que 0,05 era indicativo de haver diferença estatística entre as amostras. Para densidade do solo e microporosidade, a probabilidade indicou não haver diferença, resultando respectivamente $p=0,136$ e $p=0,4767$. Já a porosidade total e a macroporosidade apresentaram p equivalentes a 0,03298 e 0,00978, indicando diferença significativa entre as médias, como apresentado na tabela 4.

TABELA 4 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO: DENSIDADE (Ds), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (Macro) E MICROPOROSIDADE (Micro).

Fontes de variação	Graus de liberdade	Densidade		Porosidade total		Macroporosidade		Microporosidade	
		QM	p	QM	p	QM	p	QM	p
Efluentes	5	4,6E-03	0,136	0,00327	0,03298	0,00439	0,00978	0,0003	0,4767
Resíduo	24	2,4E-03	---	0,00111		0,00112		0,00032	
CV (%)		5,36		6,09		18,96		4,85	
W		0,990	0,991	0,96757	0,475	0,96757	0,475	0,96757	0,475
B ₀		2,166	0,826	7,3195	0,1979	7,3198	0,1979	7,3198	0,1979

QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV = coeficiente de variação; W = resultado do teste de Shapiro-Wilk; B₀ = resultado do teste de Bartlett

FONTE: A autora (2021)

A não diferença estatística na densidade do solo era desejada visto que, o objetivo principal do estudo é a análise da condutividade hidráulica, dessa forma o melhor cenário seria obter amostras sob as mesmas condições físicas, condição que

foi atingida. Objetivando isso durante a coleta das amostras procurou-se amostrar de uma área pequena, sob mesma condição física.

Quanto a porosidade total houve diferença estatística, assim como também houve para a macroporosidade, que é responsável majoritária pelo transporte de líquidos no solo (PEREIRA et al., 2008). Não foi identificado pelos valores obtidos, variação estatística da microporosidade das amostras.

Segundo a tabela 5, de médias e desvio padrão das propriedades, é possível observar em quais efluentes houve correlação e em quais não houve. Em relação a porosidade total e macroporosidade, observa-se que o efluente Tintas difere estatisticamente da água deionizada e do efluente Laticínios. Mas, os mesmos três não diferem dos demais efluentes - metais, têxtil e estação de tratamento.

TABELA 5 – MÉDIAS E DESVIO PADRÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO: DENSIDADE (Ds), POROSIDADE TOTAL (PT), MACROPOROSIDADE (Macro) e MICROPOROSIDADE (Micro)

Efluente	Ds (g cm ⁻³)	PT (cm ³ cm ⁻³)	Macro (cm ³ cm ⁻³)	Micro (cm ³ cm ⁻³)
Água deionizada	0,94±0,06 ^{ns}	0,59±0,02b	0,15±0,01b	0,37±0,02 ^{ns}
Estação de Tratamento	0,91±0,04	0,55±0,02ab	0,19±0,02ab	0,36±0,01
Laticínios	0,97±0,06	0,55±0,04b	0,14±0,04b	0,38±0,01
Metais	0,92±0,03	0,54±0,03ab	0,18±0,04ab	0,36±0,03
Têxtil	0,89±0,05	0,52±0,05ab	0,17±0,05ab	0,37±0,02
Tintas	0,89±0,05	0,52±0,03a	0,22±0,03a	0,36±0,01
DLB	0,92±0,05	0,56±0,09	0,17±0,11	0,39±0,02

ns = não significativo. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$)

FONTE: A autora (2021)

4.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os mesmos testes estatísticos foram realizados para os valores de condutividades obtidos no experimento. O coeficiente de variação para a condutividade foi alto, indicando alta variabilidade entre as condutividades dos efluentes. Já a probabilidade de $K1$ ($p = 0,839$), $K2$ ($p = 0,275$), e $K3$ ($p = 0,191$), analisadas separadamente demonstra que não há diferença estatística entre os efluentes estudados.

TABELA 6 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS CONDUTIVIDADES EM CONDIÇÃO DE: SOLO SATURADO POR ÁGUA (K1), SATURADO POR EFLUENTE (K2) E DE ÁGUA COM O SOLO SATURADO PELOS EFLUENTES (K3).

Fontes de variação	Graus de liberdade	K1		K2		K3	
		QM	p	QM	p	QM	p
Efluentes	5	1,2E+04	0,839	1,0E+04	0,275	2,8E+04	0,191
Resíduo	24	2,8E+04		1,9E+06		1,7E+04	
CV (%)		81,9		71,58		107,52	
W		0,854	0,001	0,833	0,000	0,724	0,000
B ₀		11,511	0,043	18,556	0,002	43,237	0,000

QM = quadrado médio; p = probabilidade; CV = coeficiente de variação; W = resultado do teste de Shapiro-Wilk; B₀ = resultado do teste de Bartlett

FONTE: A autora (2021)

O objetivo do tratamento de efluentes é a não interferência, ou a menor interferência possível, no ambiente no qual será inserido, seja ele corpo hídrico, como é o usual, ou no solo, objeto desse estudo.

Analisando as informações da tabela 6 acima é possível afirmar que o tratamento dos efluentes utilizados no estudo são eficientes, ao menos a curto prazo, pois não houve alteração das condutividades hidráulicas do solo analisando separadamente K1, K2 e K3, independente dos efluentes aplicados no experimento, e sem análise dos componentes químicos que compõem o produto.

A alta variabilidade entre as leituras das condutividades analisadas individualmente pode ser reflexo da variação entre os volumes percolados em cada amostra, que pode ter sido causada devido à dificuldade observada durante o processo experimental na vedação de alguns anéis. Logo são necessários ajustes no processo experimental visando a diminuição do valor de CV. Além desses fatores, K é uma propriedade que varia facilmente em função dos diâmetros dos poros (PREVEDELLO et. al., 2013), o que pode também ter influenciado na variabilidade das leituras.

A tabela 7 mostra as médias de condutividades para cada um dos ensaios, com efluentes ou água deionizada e também para o dejetado líquido bovino, o qual só passou pelo processo denominado K1, de saturação das amostras em água com posterior percolação do DLB, ou seja, somente há resposta de condutividade do DLB

para um cenário. Observa-se que o comportamento dos efluentes foi de diminuição da condutividade quando observado para cada efluente $K1$, $K2$ e $K3$ em sequência, exceto para o efluente de estação de tratamento, onde de $K1$ para $K2$ houve redução da condutividade, mas de $K2$ para $K3$ observa-se aumento ($K3 = 246,296 \pm 257,52 \text{ mm h}^{-1}$), inclusive atingindo um valor superior ao inicial ($K1 = 197,706 \pm 115,28 \text{ mm h}^{-1}$).

TABELA 7 - MÉDIAS E DESVIO PADRÃO DA CONDUTIVIDADE E ÁGUA E EFLUENTES EM CONDIÇÃO DE: SOLO SATURADO POR ÁGUA ($K1$), SATURADO POR EFLUENTE ($K2$) E DE ÁGUA COM O SOLO SATURADO PELOS EFLUENTES ($K3$).

Efluente	K1 (mm h ⁻¹)	K2 (mm h ⁻¹)	K3 (mm h ⁻¹)
Água deionizada	172,486±179,84	172,486±179,84	172,486±179,84
Estação de Tratamento	197,706±115,28	136,426±54,51	246,296±257,52
Laticínios	131,764±58,77	71,422±34,58	58,642±22,47
Metais	237,852±302,74	79,36±37,13	61,046±14,48
Têxtil	261,958±149,61	175,9±85,47	105,304±44,03
Tintas	233,002±85,70	100,918±33,56	82,678±19,5
DLB	1,97±1,06		

ns = não significativo. Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$).

FONTE: A autora (2021)

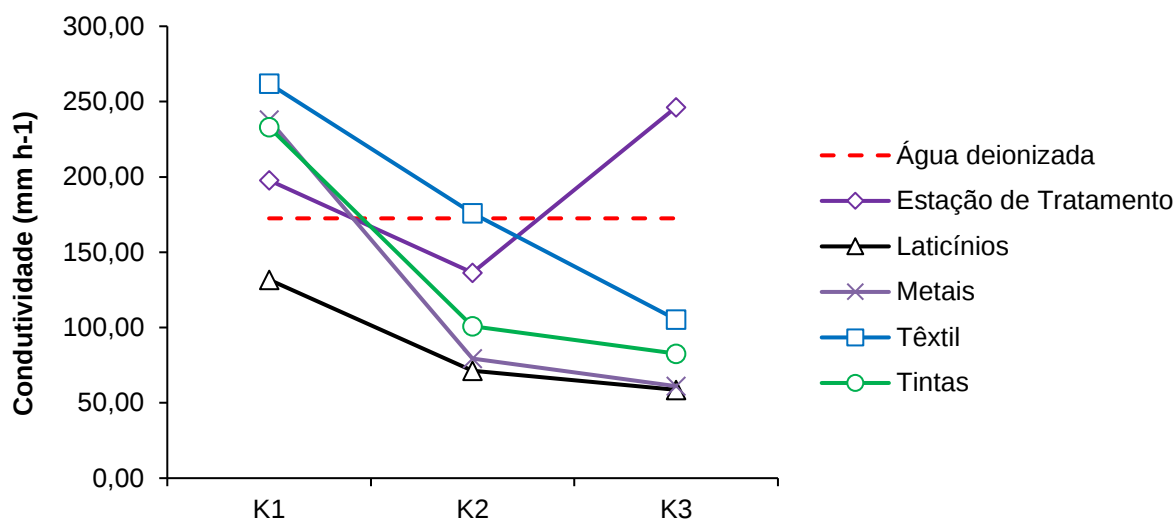
O desvio padrão observado foi alto, sendo o menor deles para o efluente de metais em $K3$ (de 14,48 mm h⁻¹), e maior também em metais, mas em $K1$ (de 302,75 mm h⁻¹), evidenciando novamente a alta variação nos volumes percolados, mesmo dentro do mesmo grupo de amostras.

Rodrigues (2010) observou a influência de diversos contaminantes na condutividade hidráulica. Entre as análises, a maior condutividade hidráulica observada foi para a percolação de chorume, e a menor quando o solo foi percolado por biossurfactante. Observando todos os valores de condutividade da tabela 7, o maior valor absoluto é do efluente Estação de tratamento, que contém chorume.

O efluente de laticínios obteve a menor média de condutividade para todos os três processos experimentais, como observado no gráfico 1. Já o efluente Têxtil seguiu o comportamento de redução da condutividade, mas observando separadamente os cenários, esse efluente apresentou as maiores médias de condutividade quando as amostras foram saturadas em água e percoladas pelo efluente ($K1$), e também quando a amostra foi saturada e percolada no efluente ($K2$). Já para

o processo de saturação em efluente e passagem de água deionizada a maior média observada foi para o efluente da estação de tratamento.

GRÁFICO 1 – CONDUTIVIDADES HIDRÁULICAS PARA OS DIVERSOS EFLUENTES NAS TRÊS ETAPAS: CONDUTIVIDADE DE EFLUENTE EM SOLO SATURADO POR ÁGUA (K1), CONDUTIVIDADE DE EFLUENTE EM SOLO SATURADO POR EFLUENTE (K2), CONDUTIVIDADE DE EFLUENTE EM SOLO SATURADO POR EFLUENTE E PERCOLADO POR ÁGUA DEIONIZADA (K3)



FONTE: A autora (2021)

O efluente Laticínio apresenta a menor condutividade nos três cenários. Também foi observado que as amostras utilizadas para os tratamentos com efluente Laticínio são as com menor valor de porosidade total. Andrade e Cruciani (1996) observaram que um solo com alto teor de sódio possui valores mais baixos de condutividade hidráulica, o que pode explicar os menores valores da K para esse efluente, que é rico em sódio. Já Ruiz et. al (2014) demonstrou que para um latossolo, a diminuição da condutividade hidráulica entre amostras se relacionava a também diminuição na quantidade de macroporos, fato que também pode estar associado ao menor K identificado para os ensaios com esse efluente, visto que segundo a tabela 5 a macroporosidade das amostras de laticínio foram as menores de todo o experimento, $\text{Macro} = 0,14 \pm 0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Já o efluente de metais foi de maneira geral o efluente que obteve maior valor de condutividade sobre os cenários testados, excluindo-se o comportamento do efluente Estação de Tratamento. Como se sabe, a galvanização, que gerou o efluente utilizado no estudo, é o processo de aplicação de zinco sobre superfícies de aço.

Dessa forma pode se interpretar que o efluente é rico em tal composto químico. Um estudo realizado por Danilo et. Al (2014) mostrou que a irrigação de um solo com águas residuais ricas em micronutrientes não afetou os teores de zinco desse mesmo solo. Já Rodrigues (2010) alerta sobre a possibilidade da alteração da baixa mobilidade de metais pesados nos solos, sendo o zinco um deles, sobre variação do pH por exemplo, variação que não foi analisada neste estudo.

É possível observar também pelo gráfico o comportamento de diminuição ao longo do tempo. Apesar disso vale ressaltar que o prazo dos experimentos foi curto, então seria necessário avaliar os ensaios por um período maior para visualizar se a condutividade continuaria diminuindo.

Sugere-se para futuros trabalhos avaliar paralelamente o acúmulo de substâncias nas amostras ao longo dos processos de percolação.

5 CONCLUSÃO

Não se observa variação da densidade do solo, porém existe variação de porosidade total e macroporosidade mesmo amostrando em uma pequena área. Para evitar essa variabilidade pode-se considerar amostrar em local com condições mais controladas, por exemplo de uma seção de área onde não há passagem de maquinário agrícola. É interessante que nas amostras não haja variação da macroporosidade visto que essa propriedade é uma das que mais influência na condutividade hidráulica em solos.

A curto prazo não houve diferença entre as condutividades para os diversos efluentes, mas houve diminuição da condutividade hidráulica na variação do procedimento experimental, ao longo das análises. Esse comportamento pode ser evidenciado com estudos por períodos maiores, ou com uma maior quantidade de amostras no mesmo ensaio, já que no presente estudo foram estudadas por ensaio 5 amostras.

Sugere-se para futuros trabalhos condicionar as amostras a tempos de saturação nos efluentes maiores, para simular um longo período de deposição do efluente, e observar o comportamento da condutividade sob tal aspecto. E realizar o mesmo procedimento dos ensaios para determinação das condutividades mais de uma vez nas mesmas amostras para observar se o comportamento observado nesse estudo se mantém. Além disso, seria interessante acompanhar também parâmetros químicos e biológicos das amostras ao longo dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- AGUIDA, L. M. et al. Caracterização De Resíduos Da Suinocultura, Da Indústria Têxtil E De Urina Humana Para Aplicação Como Fertilizante. *Revista de Estudos Ambientais*, v. 18, n. 2, p. 52, 2017.
- AMOATEY, P. e BANI, R. Wastewater Management. *InTech*, v. 130, n. 6, p. 22, 2011.
- ANDRADE, L. N. V. de; CRUCIANI, D. E. Condutividade hidráulica no processo de eluição em um solo bruno-não-cálcico. *Scientia Agricola*, v. 53, n. 1, p. 43-50, 1996.
- ARAÚJO, A. S. F. e MONTEIRO, R. T. R. e CARDOSO, P. F.. Composto de lodo têxtil em plântulas de soja e trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, n. 6, p. 549–554, 2005.
- ARAÚJO, R. H. C. R.. ESTATÍSTICA EXPERIMENTAL: (Conteúdo Didático). [S. n.] Pombal, PB: Ministério da Educação, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar. Unidade Acadêmica de Ciências Agrárias, 2015
- ARAUJO, W. e SOBRINHO, N. e ARAUJO, W. S. Influência Das Propriedades Físicas E Químicas De Solos Intemperizados Na Adsorção De Chumbo, Cobre E Zinco. *Floresta e Ambiente*, v. 7, n. único, p. 167–180, 2012.
- AZEVEDO, M. R. de Q. A. et al. Efeito da irrigação com água residuária tratada sobre a produção de milho forrageiro. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 2, n. 1, p. 63–68, 2007.
- BARBOSA FILHO, M. P. e DYNIA, J. F. e FAGERIA, N. K.. Zinco e Ferro na Cultura do Arroz. Brasília, DF: [s.n.], 1994.
- BASTOS, R. K. et al. Effect of swine wastewater on *Jatropha curcas* L. oil acidity. *Industrial Crops and Products*, v. 74, p. 642–647, 2015.
- BIZARI, D. R. e CARDOSO, J. C. Água de reuso e horticultura urbana: Aliança para a criação de cidades mais sustentáveis. *Horticultura Brasileira*, v. 34, n. 3, p. 311–317, 2016.
- BRASIL. Resolução No 420, de 28 de dezembro de 2009. *Diário oficial da união*, v. 2013, p. 81–84, 2009.
- CEARÁ. Conselho Estadual do Meio Ambiente (Coema). Resolução nº 02, de 02 de Fevereiro de 2017. Dispõe sobre os padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. CE. 2017
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE- CONAMA. Resolução Nº 430, De 13 De Maio De 2011. p. 8, 2011.
- COSTA, P. R. O. et al. ALTERAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO APÓS APLICAÇÃO DE BÍOSSÓLIDOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE FÁBRICA DE PAPEL RECICLADO. *FLORESTA*, v. 39, n. 1, p. 1–10, 2009.

CUNHA, A. H. et al. O REÚSO DE ÁGUA NO BRASIL: A IMPORTÂNCIA DA REUTILIZAÇÃO DE ÁGUA NO PAÍS. ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, v. 66, n. July, p. 37–39, 2011.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. / Paulo César Teixeira ... [et al.], Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed. Brasília, DF: [s.n.], 2017. v. 1.

EPA Method 3051, Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils, 1994

FAVARETTO, N. et. al., s.d. Mapa de Aptidão Agrícola. 1:200. Paraná: UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ.

FEPAM. Portaria FEPAM No68/2019. Diário oficial Estado Rio Grande do Sul, 2019. FIGUEIREDO, Thayana Caroline Fontes et al. Caracterização físico-química dos efluentes de uma indústria de laticínios. 2015, [S.l: s.n.], 2015. p. 599–609.

GOMES, V. M. et al. Avaliação do sistema de tratamento de efluentes gerados em indústria de laticínios. In: Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332. 2017. p. 29-37.

GONÇALVES-MADURO, L. et al. Soil water and fuel permeability of a Cambisol in southern Brazil and its spatial behavior: A case study. Vadose Zone Journal, v. 19, n. 1, p. 1–12, 2020.

HARRISON, R. B et al. Reciclagem de resíduos industriais e urbanos em áreas de reflorestamento. CIRCULAR TÉCNICA IPEF, n. 198, p. 01–20, 2003.

HESPANHOL, I.. Potencial de Reuso de Água no Brasil Agricultura, Industria, Municípios, Recarga de Aquíferos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7, n. 4, p. 75–95, 2002. IAC. Solos do Estado de São Paulo. p. 1–3, 2020.

JACQUEMET, V e GHERMAN, E C e KONIG, E. Organic matter evolution in the treatment process of the New Goreangab Water Reclamation plant at Windhoek , Namibia. 2007, Antwerp, Belgium: [s.n.], 2007.

LADEIRA, A. C. Q. e PEREIRA, D. B. A.. Avaliação do potencial poluidor da indústria galvânica: caracterização, classificação e destinação de resíduos. Rem: Revista Escola de Minas, v. 61, n. 3, p. 385–390, 2008.

LIMA, C. G. R. et al. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 31, p. 1233-1244, 2007.

LIMA, H. V. e SILVA, A. P. Mesa de tensão com areia: procedimentos para montagem e validação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 5, p. 2209–2214, 2008.

LIU, R. et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions. Science of the Total Environment, v. 468–469, p. 1069–1077, 2014.

MACIEL, T. M. S. e ALVES, M. C. e SILVA, F. C. Atributos químicos da solução e do solo após aplicação de resíduo da extração de celulose. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 1, p. 84–90, 2015.

MAEDA, S. e BOGNOLA, I. A. Propriedades químicas de solo tratado com resíduos da indústria de celulose e papel. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 33, n. 74, p. 169–177, 2013.

MARONEZI, V. et al. MECANISMOS DE REMOÇÃO DE CROMO(VI) DO SOLO PELA INTERAÇÃO ENTRE MATÉRIA ORGÂNICA E FERRO(III) Vanessa. *Revista do Instituto Geologico*, v. 40, n. 2, p. 17–33, 2019.

MARQUES, J. D. O. et al. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. *Acta Amazonica*, v. 38, n. 2, p. 193–206, 2008.

MEDEIROS, J. C.. Resíduo alcalino da indústria de papel e celulose na correção da acidez de um cambissolo húmico álico. *Dissertação (mestrado) – Centro de Ciências Agroveterinárias / UDESC, Lages*, p. 79, 2008.

MELI, S. et al. Influence of irrigation with lagooned urban wastewater on chemical and microbiological soil parameters in a citrus orchard under Mediterranean condition. *Science of the Total Environment*, v. 285, n. 1–3, p. 69–77, 2002.

MENEZES, C. M. S. REUSO DE EFLUENTE CERVEJEIRO TRATADO PARA FINS AGRÍCOLAS – UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE ESTÂNCIA/SE. . [S.l.: s.n.], 2019.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O.. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

MORAIS, N. W. S. e SANTOS, A. B. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. *Revista DAE*, v. 67, n. 215, p. 40–55, 2019.

PELLISSARI, R. A.Z. et al. Lodo têxtil e água residuária da suinocultura na produção de mudas de eucalyptus grandis. *Engenharia Agrícola*, v. 29, n. 2, p. 288–300, 2009.

PEREIRA, T. I. et al. Condutividade Hidráulica Saturada e propriedades físicas do solo em área de pastagem degradada em Argissolo na Depressão Central do RS. *Grupo de física do solo da UFSM*, 2008.

POKRYWIECKI, T. S. et al. AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE LATICÍNIOS Evaluation of treatment process of dairy effluent. *Revista Acadêmica Ciência Animal*, v. 11, p. 155-161, 2013.

PRADO, R. M. e NATALE, W.. Desenvolvimento inicial e estado nutricional do maracujazeiro em resposta ?? aplica????o de lodo t??xtil. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, v. 40, n. 6, p. 621–626, 2005.

PREVEDELLO, J. et al. A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo The functionality of soil porous system in eucalyptus forestry on a Hapludalf.

RAIJ, B. V. et al. Chemical analysis to available the fertility of tropical soils. [S.l: s.n.], 2001.

R CORE TEAM (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RIBEIRO, K. D. et al. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. Ciência e Agrotecnologia, v. 31, p. 1167-1175, 2007.

RODRIGUES, G. I. B. Estudo da condutividade hidráulica em argila compactada saturada e da interação físico-química quando percolada por fluidos contaminantes e biossurfactante. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

RODRIGUES, R. S.. As dimensões legais e institucionais do reuso de água no Brasil: proposta de regulamentação do reuso no Brasil. p. 177, 2005.

RUIZ, H. A. et al. Condutividade hidráulica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em Latossolos artificialmente compactados. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, p. 1003-1009, 2014.

SANTOS, R. F. e MATSURA, E. E. e SANTOS, R. K.. Implicações do reuso de efluente de esgoto doméstico ratado na irrigação agrícola. Acta Iguazu, v. 4, n. 2, p. 70–86, 2015.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Lodo de curtume: critérios para o uso em áreas agrícolas e procedimentos para apresentação de projetos (Manual Técnico - Norma P4.233). São Paulo, 1999. 35p

SEMACE - SUPERINTENDENCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, Portarias e SEMACE, Portaria e ESTADUAL, Lei. Resolução COEMA No 2 DE 02/02/2017. 2017.

SHARMA, S. K. e KENNEDY, M. D. Soil aquifer treatment for wastewater treatment and reuse. International Biodeterioration and Biodegradation, v. 119, p. 671–677, 2017.

SCHOSSLER, T. R. et al. Condutividade hidráulica em campo e laboratório sob diferentes sistemas de manejo em Latossolo Amarelo. In: Embrapa Cerrados-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. Ciência do solo: para quê e para quem: anais. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013., 2013.

SILVA, A. N. EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO POR GRAMÍNEAS E EMISSÕES DE AMÔNIA EM FUNÇÃO DO MANEJO DO DEJETO LÍQUIDO DE BOVINO. 2017.

SILVA, A. N. et al. Pig slurry composting as a nitrogen source in proso millet crop. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 46, n. 1, p. 80–88, 2016.

SILVA, F. C. M. Estudo do Potencial de Recarga de Aquíferos com Águas Residuais Tratadas utilizando Sistemas de Informação Geográfica. 2011.

TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de Métodos de Análise de Solo 3a edição revista e ampliada. Manual de métodos de análise de solo - Capítulo 8 - Densidade de partículas, p. 574, 2017.

TEIXEIRA, P. T. R. et al. Análise do índice de saturação por sódio em latossolo vermelho fertirrigado com efluente de laticínios. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 5, p. 83–89, 2020.