



FLÁVIA VILELA CORRÊA

**DESEMPENHO DE DRENOS RANHURADOS
SEM MATERIAL ENVOLTÓRIO**

**LAVRAS – MG
2025**

FLÁVIA VILELA CORRÊA

DESEMPENHO DE DRENOS RANHURADOS SEM MATERIAL ENVOLTÓRIO

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Luiz Antonio Lima
Orientador

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Coorientador

LAVRAS – MG
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo(a) autor(a) através do Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA.

Corrêa, Flávia Vilela.

Desempenho de drenos ranhurados sem material
envoltório / Flávia Vilela Corrêa. 2025.
116 p. : il.

Orientador: Luiz Antonio Lima

Coorientador: Michael Silveira Thebaldi

Tese (Doutorado) - Doutorado em Recursos Hídricos -
Universidade Federal de Lavras, 2025. Bibliografia.

1. Drenagem agrícola subterrânea. 2. Carreamento de
partículas sólidas. 3. Drenos do tipo knife-cut. 4. Obstrução de
drenos. I. Lima, Luiz Antonio, orient. II. Thebaldi, Michael
Silveira, co-orient. III. Universidade Federal de Lavras. IV.
Título.

FLÁVIA VILELA CORRÊA

DESEMPENHO DE DRENOS RANHURADOS SEM MATERIAL ENVOLTÓRIO

**PERFORMANCE OF KNIFE-CUT DRAINPIPER WITHOUT ENVELOPE
MATERIAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA, em 24 de janeiro de 2025.

Dr. Luiz Antonio Lima – Universidade Federal de Lavras

Dr. Michael Silveira Thebaldi – Universidade Federal de Lavras

Dr. Marcus Metri Correa – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Adão Wagner Pêgo Evangelista – Universidade Federal de Goiás

Dr. Silvânio Rodrigues dos Santos – Universidade Estadual de Montes Claros

Prof. Dr. Luiz Antonio Lima
Orientador

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Coorientador

**LAVRAS – MG
2025**

*Aos meus queridos e amados pais, Gislane e Rogério
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Gislane e Rogério, pelo apoio e dedicação constantes. Sem vocês, eu não seria eu.

À Lusca, pelo companheirismo e cumplicidade.

À minha família e aos amigos, pela presença, mesmo quando não conseguimos nos ver com a frequência que gostaríamos.

Ao Luiz Antonio Lima e Michael Silveira Thebaldi, pela paciência e orientação desde o mestrado.

Aos professores, técnicos, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, especialmente ao Luiz Fernando Coutinho de Oliveira pela amizade e conselhos, e ao Elvis Marcio de Castro Lima e Renato Antonio da Silva, pelos auxílios quando necessários.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

À empresa Techduto, pela disponibilização de seus produtos com diferentes tipos de orifícios e pelo subsídio financeiro, que viabilizaram as análises físicas e a realização deste estudo.

À Universidade Federal de Lavras pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

NÓS CONSEGUIMOS, QUE ALEGRIA!

RESUMO

O desempenho e durabilidade dos sistemas de drenagem subterrânea estão associadas à sua capacidade de permitir o fluxo de água enquanto restringem a entrada de partículas sólidas, prevenindo obstruções que possam comprometer a capacidade de descarga e o desempenho do sistema. Para mitigar esse problema, o uso de envoltório é comum; no entanto, esses materiais elevam os custos do sistema, dificultam a instalação dos drenos, estão sujeitos à colmatação e podem favorecer a erosão hídrica. Nesse contexto, drenos com orifícios projetados para reduzir o carreamento de partículas sólidas e dispensar o uso de envoltórios, como os de formato *knife-cut*, se destacam como uma alternativa simples e econômica. Contudo, sua adoção ainda é limitada, o que se deve à escassez de estudos que comprovem sua eficácia em diferentes condições de solo e clima. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar a capacidade de admissão de água bem como as taxas de descargas e de carreamento de sólidos entre drenos com orifícios menores e no formato *knife-cut* (Dreno KC), considerados não convencionais, e drenos com orifícios maiores e arredondados, considerados convencionais, nas condições de ausência e presença de material envoltório. Para isso, foram caracterizados os orifícios de cada dreno e desenvolvidos dois aparatos experimentais: um para avaliar a capacidade de drenagem dos tubos em função de diferentes cargas hidráulicas e outro para medir a descarga e o carreamento de sólidos considerando diferentes meios porosos. Os resultados indicaram que o dreno convencional, devido à maior área de abertura de seus orifícios, apresentou menor resistência de entrada e maior raio efetivo em comparação ao dreno *knife-cut*, que possui orifícios menores. A equação de orifícios foi eficaz para representar o comportamento dos drenos convencionais e *knife-cut*, mas exigiu ajustes concomitantes no coeficiente de descarga e no expoente de carga para drenos com envoltório. Drenos com orifícios maiores aumentam a taxa de descarga, mas favorecem o transporte de sólidos, elevando o risco de obstrução. O desempenho da drenagem é influenciado pelas propriedades dos meios porosos, com solos de textura fina retardando o processo de drenagem devido à alta capacidade de retenção hídrica, enquanto solos de textura mais grossa facilitam o escoamento, mas são mais suscetíveis ao transporte de partículas. O uso de envoltório facilita o influxo de água, mas seu desempenho pode ser comprometido pela colmatação, especialmente em solos de baixa coesão. Drenos *knife-cut*, apesar de apresentarem menor capacidade de descarga, oferecem um fluxo mais estável e controlado, favorecendo a drenagem prolongada. Suas taxas de carreamento de sólidos são semelhantes às dos drenos convencionais com envoltório, sendo uma solução mais econômica e de fácil instalação.

Palavras-chave: tubo corrugado; drenos enterrados; carreamento de partículas sólidas; envoltório; drenagem agrícola.

ABSTRACT

The performance and durability of subsurface drainage systems are associated with their ability to facilitate water flow while restricting sediment entry, preventing blockages that compromise discharge capacity and system performance. To mitigate this issue, the use of envelope is common, however, these materials increase system costs, complicate drainpipe installation, are susceptible to clogging, and may promote soil erosion by water. In this context, drainage pipes with perforations designed to reduce solid particle transport and eliminate the need for envelope materials, such as knife-cut drainpipes, emerge as a cost-effective and practical alternative. However, their adoption remains limited, primarily due to the lack of studies demonstrating their effectiveness under different soil and climatic conditions. The objective of this study was to evaluate and compare the water intake capacity, discharge rates, and solid transport rates between drainpipes with smaller perforation in a knife-cut design (KC drainpipe), considered non-conventional, and drainpipes with larger and rounded perforations, considered conventional, under conditions with and without envelope material. To achieve this, the perforations of each drainpipe were characterized, and two experimental setups were developed: one to evaluate the drainage capacity of the drainpipes under varying hydraulic head, and another to measure discharge and solid transport rates across different porous media. The results indicated that the conventional drainpipe, due to the larger perforations opening area, exhibited lower entrance resistance and a larger effective radius compared to the knife-cut drain, which has smaller perforations. The orifice equation effectively represented the behavior of both conventional and knife-cut drainpipes but required simultaneous fitting to the discharge coefficient and head exponent for drainpipes with envelope material. Drainpipes with larger perforations increased the discharge rate but also facilitated sediment transport, thereby increasing the risk of clogging. Drainage efficiency is influenced by the properties of porous media, with fine-textured soils hindering drainage due to their high-water retention capacity, while coarse-textured soils facilitate water flow but are more prone to particle transport. Although envelope materials facilitate water inflow, their efficiency may be reduced by clogging, particularly in low-cohesion soils. Knife-cut drainpipes, despite having a lower discharge capacity, offer a more stable and controlled flow, promoting prolonged drainage. Their solid transport rates are comparable to those of conventional drainpipes with envelopes, making them a more economical and easier-to-install solution.

Keywords: corrugated drainpipe; buried drainpipe; sediment transport; envelope material; agricultural drainage.

IMPACTOS SOCIAIS, TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E CULTURAIS

O uso de material envoltório ao redor dos tubos de drenagem subterrânea é uma prática comum para evitar obstruções causadas pelo carreamento de partículas sólidas do solo, problema recorrente que pode reduzir a taxa de descarga e comprometer a durabilidade e eficiência do sistema. No entanto, essa solução aumenta os custos, dificulta a instalação dos drenos e gera resíduos, especialmente pelo transporte e descarte do material. Além disso, o envoltório está sujeito à colmatção, reduzindo sua permeabilidade e prejudicando o desempenho do sistema. Nesse contexto, os drenos tipo knife-cut, projetados para dispensar envoltórios, surgem como uma alternativa simples, econômica e sustentável. Contudo, sua adoção ainda é limitada pela escassez de estudos que comprovem sua eficácia. Diante disso, este estudo avaliou a capacidade de admissão de água, as taxas de descarga e o carreamento de sólidos em drenos knife-cut e convencionais, com e sem envoltório, em diferentes tipos de solo, visando fornecer evidências que, caso seu desempenho seja comprovado, possam popularizar essa tecnologia e ampliar seu uso em sistemas de drenagem subterrânea. Os resultados indicaram que, embora o dreno knife-cut apresente menor taxa de descarga, ele proporciona um fluxo mais controlado e estável ao longo do tempo, favorecendo uma drenagem prolongada e preservando os meios porosos. Além disso, as taxas de carreamento de sólidos foram semelhantes às dos drenos convencionais com envoltório. Assim, os drenos knife-cut demonstram potencial como uma solução viável para drenagem subterrânea, oferecendo vantagens como a redução de custos e a diminuição de resíduos associados à fabricação, transporte e descarte de materiais envoltórios. Os impactos dessa tecnologia são significativos. Do ponto de vista econômico, a redução de insumos torna a implementação mais acessível, beneficiando especialmente pequenos e médios agricultores. Ambientalmente, a eliminação do envoltório contribui para a redução de resíduos associados ao transporte e descarte do material, alinhando-se a práticas agrícolas mais sustentáveis e ao conceito de economia circular. Socialmente, a facilidade de instalação e o menor custo ampliam o acesso a sistemas de drenagem eficientes, reduzindo perdas agrícolas por saturação do solo e promovendo maior segurança alimentar. Além disso, a melhoria no saneamento de áreas sujeitas a inundações pode mitigar riscos de doenças de veiculação hídrica. Dessa forma, este trabalho está alinhado aos ODS da ONU, impactando diretamente os ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), 6 (Água Potável e Saneamento), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis), além de contribuir para o ODS 10 (Redução das Desigualdades), ao tornar a tecnologia acessível a produtores de menor poder aquisitivo. Inserido na área de tecnologia e produção, o estudo gera conhecimento aplicável, com potencial para integrar políticas públicas e aprimorar práticas agrícolas. Realizado na Universidade Federal de Lavras (UFLA), o estudo envolve docentes, pesquisadores e estudantes, consolidando-se como uma iniciativa científica com forte aplicabilidade prática e impacto na sustentabilidade agrícola.

SOCIAL, TECHNOLOGICAL, ECONOMIC AND CULTURAL IMPACTS

The use of envelope material around subsurface drainage pipes is a common practice to prevent blockages caused by the transport of solid particles from the soil, a recurring issue that can reduce discharge rates and compromise the durability and efficiency of the system. However, this solution increases costs, complicates the installation of drainpipes, and generates waste, particularly from the transportation and disposal of the material. Moreover, the envelope material is prone to clogging, which reduces its permeability and impairs the system's performance. In this context, knife-cut drainpipes, designed to eliminate the need for an envelope material, emerge as a simple, cost-effective, and sustainable alternative. However, their adoption remains limited due to the scarcity of studies demonstrating their effectiveness. Therefore, this study evaluated the water admission capacity, discharge rates, and solid transport in knife-cut and conventional drainpipes, with and without envelope material, across different soil types. The objective was to provide empirical evidence that, if their performance is validated, could promote the widespread adoption of this technology and expand its application in subsurface drainage systems. The results indicated that, although knife-cut drainpipes exhibit lower discharge rates, they provide a more controlled and stable flow over time, facilitating prolonged drainage while preserving the integrity of the porous médium. Additionally, the solid transport rates were comparable to those observed in conventional drainpipes with envelope material. Thus, knife-cut drainpipes demonstrate potential as a viable solution for subsuperficial underground drainage, providing advantages such as cost reduction and minimizing waste associated with the production, transport, and disposal of envelope materials. The impacts of this technology are substantial. Economically, the reduction in material inputs makes its implementation more cost-effective, particularly benefiting small and medium-scale farmers. Environmentally, the elimination of envelope material contributes to the reduction of waste associated with the transport and disposal of materials, aligning with more sustainable agricultural practices and the principles of a circular economy. Socially, the ease of installation and reduced costs improve access to efficient drainage systems, mitigating agricultural losses due to soil saturation and enhancing food security. Furthermore, improvements in the sanitation of flood-prone areas can reduce the risks of waterborne diseases. Therefore, this study aligns with the UN SDGs, directly contributing to SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), and SDG 12 (Responsible Consumption and Production), while also supporting SDG 10 (Reduced Inequality) by making the technology accessible to lower-income producers. Positioned within the field of technology and production, this research generates practical knowledge with the potential to inform public policy and improve agricultural practices. Conducted at the Universidade Federal de Lavras (UFLA), this study involves faculty, researchers, and students, establishing it as a scientific initiative with significant practical applicability and a notable impact on agricultural sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Zonas agroclimáticas.	15
Figura 1.2 - Tendência do rendimento das culturas ao longo dos anos com e sem o emprego de drenagem agrícola adequada.....	17
Figura 1.3 - Representação esquemática do lençol freático em um solo sem drenagem e com drenagem subterrânea.	19
Figura 1.4 - Esquematização dos drenos de acordo com sua função em um sistema de drenagem agrícola.	20
Figura 1.5 - Drenos abertos e fechados.	21
Figura 1.6 - Drenos subterrâneos obstruídos devido ao carreamento de partículas sólidas que se acumularam no interior das tubulações.	23
Figura 1.7 - Recomendações do uso de material envoltório em função das diferentes texturas do solo.....	26
Figura 1.8 - Poço tubular subterrâneo.	28
Figura 1.9 - Redes de fluxo da água do solo em direção a um dreno subterrâneo: fluxo horizontal (Fh), vertical (Fv), radial (Fr) e de entrada (Fe).	35
Figura 1.10 - Simulação das linhas de fluxo da água no solo (linhas brancas) adentrando as perfurações de um dreno tubular corrugado nas condições de ausência (a) e presença (b) de material envoltório ao redor dos tubos.	36
Figura 2.1 - Drenos utilizados no experimento a) dreno com orifícios menores, no formato <i>knife-cut</i> , designado “Dreno KC”; b) dreno com orifícios maiores, no formato arredondado, designado “Dreno SM”.....	57
Figura 2.2 - Esquematização da estrutura que envolve o dreno avaliado e permite a variação da carga hidráulica sobre o dreno: partes constituintes (a); e estrutura com o 12º orifício aberto e demais vedados, em visão frontal (b) e lateral (c).	59
Figura 2.3 - Esquematização do processo de envolvimento do dreno: preparação do dreno (a) dreno encamisado pelo tubo PVC DN 150 e conectado ao sistema de descarga (b).	60
Figura 2.4 - Aparato experimental: corte (a), vista superior (b), frontal (c) e lateral (d) do sistema.	62
Figura 2.5 - Efeito da fonte de variação carga hidráulica sobre a vazão escoada por orifício.	70

Figura 2.6 - Efeito do desdobramento da fonte de variação “carga hidráulica” dentro de cada nível do fator “sistema drenante”.	72
Figura 2.7 - Vazão drenada observada (Dados obs.) e calculada pela equação de orifícios ajustada (Dados calc. – Cd) para o sistema drenante KC (a); SM (b) e CM (c), considerando, para este último, o ajuste único e concomitante do coeficiente de descarga com o expoente carga (Dados calc. – Cd; e Dados calc. – Cd e X, respectivamente).	74
Figura 2.8 - Aparato experimental: em vista frontal (a) e a planta baixa (b).....	89
Figura 2.9 - Análise granulométrica do meio poroso arenoso (A), caulim (C) e franco (F) de acordo com a classificação ABNT – NBR 6502 (1995).	92
Figura 2.10 - Retenção de água nos meios porosos arenosos, franco e caulim.	93
Figura 2.11 - Efeito do desdobramento de tempo dentro de cada nível de meio poroso e sistema drenante para o meio poroso arenoso (A), caulim (B) e franco(C).	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Caracterização geométrica dos orifícios para a passagem de água do tubo de drenagem com orifícios em formato <i>knife-cut</i> (Dreno KC) e convencional sem envoltório (Dreno SM).	66
Tabela 2.2 - Resumo da ANOVA realizada na avaliação da vazão escoada por orifício dos drenos estudados em função dos tratamentos aplicados.	68
Tabela 2.3 - Média das vazões escoadas por orifício obtidas para os drenos com orifícios em formato <i>knife-cut</i> (Dreno KC) e em formato convencional, na condição de ausência (Dreno SM) e presença (Dreno CM) de material envoltório.....	69
Tabela 2.4 - Desdobramento da fonte de variação sistemas drenante dentro de cada nível do fator carga hidráulica.....	71
Tabela 2.5 - Coeficiente de descarga parcial obtido para cada carga hidráulica e sistema drenante estudado.....	76
Tabela 2.6 - Densidade de partículas (Dp), densidade (Ds), porosidade total (PT), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), condutividade hidráulica do meio poroso saturado (Ksat) e limites de liquidez (LL), plasticidade (LP), e índice de plasticidade (IP) dos meios porosos estudados.	92
Tabela 2.7 - Resumo da ANOVA para a descarga total e sólidos carregados totais para os sistemas drenantes aplicados em cada um dos meios porosos.....	94
Tabela 2.8 - Média das descargas totais e sólidos carregados totais obtidos para os drenos com orifícios em formato <i>knife-cut</i> (KC) e em formato convencional, na condição de presença (CM) e ausência (SM) de material envoltório, em cada um dos meios porosos.	94
Tabela 2.9 - Resumo da ANOVA realizada na avaliação da descarga parcial e sólidos carregados parciais dos drenos estudados em função do tempo e dos tratamentos aplicados.	104

SUMÁRIO

1	PARTE 1 – ASPECTOS GERAIS	11
1.1	INTRODUÇÃO GERAL	12
1.2	REFERENCIAL TEÓRICO GERAL	14
1.2.1	Drenagem agrícola	14
1.2.2	Métodos, sistemas e delineamento da drenagem.....	18
1.2.3	Uso de envoltório em tubos de drenagem	23
1.2.4	Propriedades físicas e hidráulicas do solo que influenciam a drenagem	30
1.2.4.1	Potencial total de água no solo e Lei de Darcy.....	30
1.2.4.2	Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}).....	32
1.2.4.3	Porosidade.....	33
1.2.5	Rede de fluxo, perda de carga e resistência de entrada.....	35
	REFERÊNCIAS.....	38
2	PARTE 2 – ARTIGOS.....	50
2.1	ARTIGO 1 – CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE DRENOS TUBULARES COM ORIFÍCIOS QUE DISPENSAM O USO DE MATERIAL ENVOLTÓRIO EM DRENAGEM SUBTERRÂNEA.....	51
2.1.1	INTRODUÇÃO.....	53
2.1.2	MATERIAL E MÉTODOS	56
2.1.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
2.1.4	CONCLUSÃO.....	78
	REFERÊNCIAS.....	79
2.2	ARTIGO 2 – DESCARGA E TRANSPORTE DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EM DRENOS TUBULARES COM ORIFÍCIOS RANHURADOS	83
2.2.1	INTRODUÇÃO	85
2.2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	88
2.2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
2.2.4	CONCLUSÃO.....	110
	REFERÊNCIAS.....	111
3	TERCEIRA PARTE – CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
3.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	116

1 PARTE 1 – ASPECTOS GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

A drenagem subterrânea permite, entre outros benefícios, o controle do nível do lençol freático e teor de sais no solo, sendo considerada essencial em diversas áreas da engenharia e agricultura. O desempenho e a durabilidade desses sistemas dependem de sua capacidade de permitir o fluxo de água enquanto limita a entrada de sólidos nos tubos de drenagem, já que, ao se movimentar no solo, a água pode transportar partículas para o interior dos drenos, e seu acúmulo pode causar obstruções que comprometem a capacidade de descarga e, consequentemente, o desempenho e durabilidade do sistema ao longo do tempo. Além disso, os espaços vazios deixados pelos sólidos removidos do solo, constituem-se em caminhos preferenciais da água do solo onde, em seguida, acentua-se a erosão interna do solo.

Embora os materiais envoltórios, como os geotêxteis, sejam comumente reconhecidos na drenagem subterrânea por sua eficácia no controle do carregamento de sólidos do solo, sua aplicação impõe desafios adicionais. Esses materiais elevam os custos do sistema, podem gerar resíduos associados ao transporte e descarte, dificultam a instalação dos drenos e são suscetíveis à colmatção no caso de envoltórios com fibras geossintéticas, fenômeno que, a longo prazo, também pode reduzir o desempenho do sistema. Entende-se por colmatção o acúmulo de sólidos sobre uma superfície porosa, vedando seus poros e reduzindo sua permeabilidade. Além disso, em certas circunstâncias, o uso de envoltórios pode aumentar a velocidade do fluxo solo-dreno de maneira expressiva, o que pode agravar a erosão hídrica e intensificar os problemas de obstrução, principalmente em solos de baixa coesão e estabilidade estrutural.

Assim, torna-se necessário o desenvolvimento e implementação de tecnologias que dispensem o uso de envoltórios e reduzam os riscos associados à erosão hídrica na drenagem subterrânea. Nesse contexto, drenos projetados para minimizarem o carregamento de sólidos e dispensarem o uso de envoltório, como os drenos com orifícios em formato *knife-cut*, apresentam-se como uma alternativa simples e economicamente viável. No entanto, apesar de seu potencial promissor, sua adesão em sistemas de drenagem subterrânea ainda é baixa. Essa limitação pode ser atribuída, sobretudo, à escassez de estudos que comprovem seu bom desempenho em diferentes condições de solo e clima, o que dificulta sua popularização e uso em larga escala.

Então, dada a complexidade e relevância da drenagem subterrânea para a gestão dos recursos hídricos e a produtividade agrícola (Kaur *et al.*, 2023; Minnes *et al.*, 2020; Yannopoulos *et al.*, 2020), este estudo avalia a hipótese de que drenos projetados para uso sem envoltório podem ser alternativas eficazes aos modelos convencionais, possibilitando a

simplificação da instalação de sistemas de drenagem subterrânea, com redução de custos e minimização da geração de resíduos. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar a capacidade de admissão de água bem como as taxas de descargas e de carreamento de sólidos por um modelo de dreno com orifícios considerados convencionais e por outro com orifícios no formato *knife-cut*, cuja aplicação em drenagem subterrânea ainda é pouco explorada.

A estrutura desta tese foi organizada em três partes principais. A primeira parte aborda aspectos fundamentais para a compreensão da drenagem agrícola subterrânea e seus desafios, incluindo os tipos e métodos de drenagem, seus benefícios, os diferentes tipos de drenos, problemas relacionados à erosão hídrica, o uso de envoltório em tubos de drenagem e as principais propriedades físicas e hídricas do solo que influenciam a drenagem. A segunda parte apresenta dois artigos. O primeiro trata da caracterização hidráulica dos drenos estudados, incluindo a análise geométrica dos orifícios para a passagem de água, quantificação da vazão escoada por orifícios, resistência de entrada e raio efetivo dos drenos, relação entre vazão drenada e carga hidráulica, e a verificação da adequação da equação de orifícios para cálculo de influxo de água em drenos. Já o segundo artigo avalia o comportamento da taxa de descarga e o carreamento de sólidos dos drenos em diferentes meios porosos, como arenoso, franco e de caulim. Por fim, a terceira parte apresenta uma conclusão geral dos resultados obtidos, destacando sua contribuição para o avanço do conhecimento científico e o aprimoramento das técnicas de drenagem subterrânea.

1.2 REFERENCIAL TEÓRICO GERAL

1.2.1 Drenagem agrícola

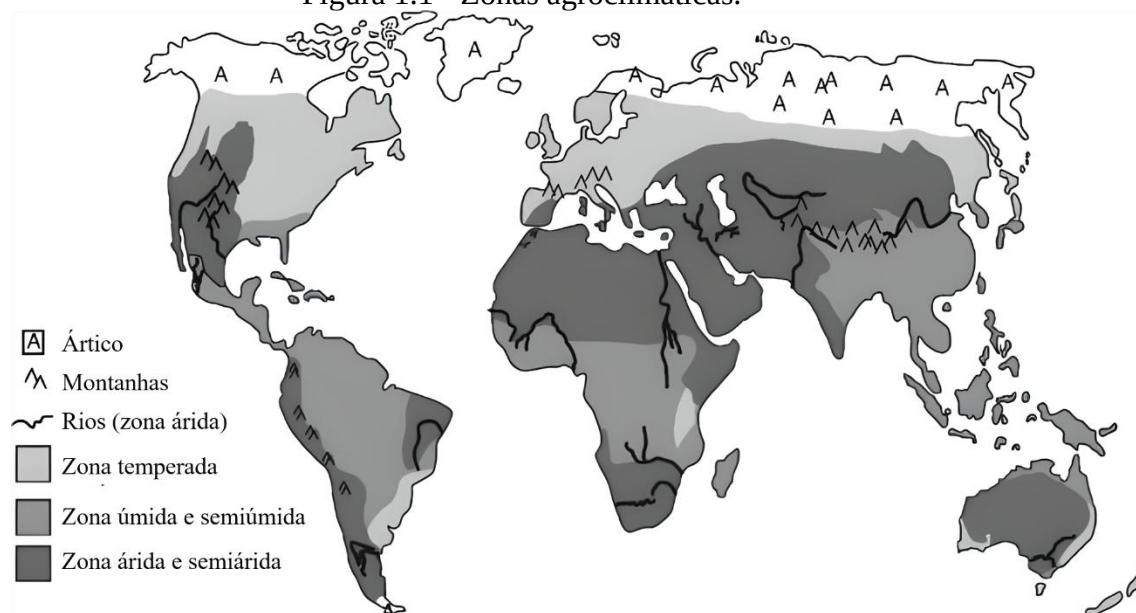
O termo “drenagem”, sob o ponto de vista agrícola, pode ser entendido como o processo de remoção do excesso de água na superfície ou no perfil dos solos, de forma a propiciar condições favoráveis de umidade, aeração e estruturação (Kaur *et al.*, 2023; Valipour *et al.*, 2020; Yannopoulos *et al.*, 2020), para o desenvolvimento dos cultivos. Esse processo pode ocorrer de forma natural ou por meio da implementação de condutos hidráulicos subterrâneos ou superficiais abertos, sendo a drenagem artificial necessária sempre que a natural não for satisfatória (ICID, 1996; Schultz; Zimmer; Vlotman, 2007; Wit *et al.*, 2022).

Pode-se dizer que os principais objetivos dessa técnica são: incrementar novas áreas à produção agrícola, prevenir ou recuperar solos salinizados, promover o rebaixamento do lençol freático e remover elementos tóxicos acumulados no solo. Além disso, a drenagem também pode ser empregada com o propósito de remover os danos causados pelo excesso de precipitação pluvial e sanear áreas inundadas, o que reflete diretamente na saúde pública, uma vez que águas paradas podem favorecer o desenvolvimento de agentes patogênicos e a infestação de pragas e insetos em áreas urbanas e rurais (Lubis, 2021; Ntajal *et al.*, 2022; Owusu-ansah, 2016; Silva; Barbosa, 2021; Teles *et al.*, 2023; Urban *et al.*, 2015).

Segundo Yannopoulos *et al.* (2020), a drenagem agrícola desempenha importante papel na produção alimentícia mundial e na conservação dos recursos do solo. Os autores ressaltam que essa técnica pode proporcionar o desenvolvimento máximo de uma cultura e a maior produtividade e recuperação dos solos, o que reflete positivamente na lucratividade do produtor e na eficiência da utilização dos recursos naturais. De forma semelhante, Castellano *et al.* (2019) ressaltam que a irrigação e a drenagem estão entre as técnicas de otimização agrícola mais eficientes e difundidas no mundo.

Salienta-se que, atualmente a drenagem é entendida como um elemento constituinte da gestão total dos recursos hídricos, e não apenas como processo de remoção do acúmulo indesejado de água e sais do solo (Kaur *et al.*, 2023; Minnes *et al.*, 2020; Yannopoulos *et al.*, 2020). O manejo da água relacionada ao uso agrícola ao redor do mundo, principalmente no que tange à irrigação e a drenagem, pode ser segregado, de maneira simplificada, de acordo com três zonas agroclimáticas (Figura 1.1): árida e semiárida, temperada e úmida e semiúmida (Bouarfa *et al.*, 1996; Schultz, 2001; Smedema; Vlotman; Rycroft, 2004).

Figura 1.1 - Zonas agroclimáticas.



Fonte: adaptado de Smedema, Vlotman e Rycroft (2004) citado por Schultz, Zimmer e Vlotman (2007).

Desta forma, têm-se que diferentes regiões exigem diferentes instrumentos e formas de gestão da água (Schultz, 1993; Wit *et al.*, 2022). As zonas áridas e semiáridas, por exemplo, são caracterizadas por precipitações escassas e mal distribuídas, e por esse motivo, a produção agrícola é comumente irrigada. No entanto, quando mal manejada, a irrigação contribui com a formação e elevação do lençol freático que, ao aproximar-se da superfície do solo e com a ocorrência de fluxo por capilaridade, traz para a superfície do solo água e sais que, ao longo do tempo, aumentam de concentração já que apenas vapor d'água é transferido para atmosfera. Isto resulta no processo de salinização dos solos, o que em casos severos, inibe o desenvolvimento das culturas e causa a infertilidade do solo. A este fenômeno é atribuída a dizimação da mesopotâmia, atualmente na região ocupada pelo Iraque. Nesse sentido, a drenagem é aplicada, principalmente, com o intuito de prevenir o acúmulo de sais e o excesso de umidade do solo que, porventura, podem ser ocasionados pela irrigação (Aboelsoud *et al.*, 2022; Hosseini; Bailey, 2022; Schultz, 2001; Singh, 2020; Wang *et al.*, 2023).

O problema da salinidade em áreas irrigadas é um fenômeno complexo e recorrente. A água irrigada comumente apresenta sais dissolvidos e traços de elementos químicos que tendem a se acumular na rizosfera devido ao processo de evapotranspiração das culturas. Além disso, a ascensão capilar da água de lençóis freáticos rasos também pode contribuir com esse fenômeno. Nesse sentido, a drenagem possibilita a manutenção do equilíbrio salino por meio da lixiviação e do rebaixamento do nível de água subterrâneo (Abdel-Dayem, 2000; Dou *et al.*, 2022;

Schultz; Zimmer; Vlotman, 2007; Smedema; Vlotman; Rycroft, 2004; Verma *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023).

Nas zonas temperadas, a prática da agricultura irrigada tende a acontecer majoritariamente no período da estiagem, de forma complementar às chuvas. Nessas áreas, a drenagem é empregada principalmente para prevenir a salinização dos solos no período seco e o acúmulo de precipitação no período chuvoso. Já nas zonas úmidas e semiúmidas, onde os índices pluviométricos são maiores e melhor distribuídos, os principais objetivos dessa técnica é evitar que o teor de água do solo exceda a capacidade de campo, melhorar as condições de trafegabilidade nas áreas agrícolas e reduzir a transmissão de doenças de veiculação hídrica (Castellano *et al.*, 2019; Moursi; Youssef; Chescheir, 2022; Schultz, 2001).

A saturação hídrica implica na redução da percentagem de ar no solo e, com isto, o oxigênio. Pequenos períodos de condições anaeróbicas ou anóxicas podem prejudicar a produção de certas culturas e a sobrevivência de microrganismos aeróbicos que atuam diretamente na decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, fixação de nitrogênio no solo entre outros. Plantas em solos em condição de alta umidade tendem a apresentar perda de geotropismo nas raízes, biomassa da parte aérea e do sistema radicular reduzidas, clorose, murcha foliar e deficiência de clorofila foliar, o que contribui para a queda da produtividade agrícola (Malik; Khan; Israr-Ud-Din, 2022; Martínez-Arias *et al.*, 2022; Saedi *et al.*, 2021; Usharani; Roopashree; Dhananjay, 2019).

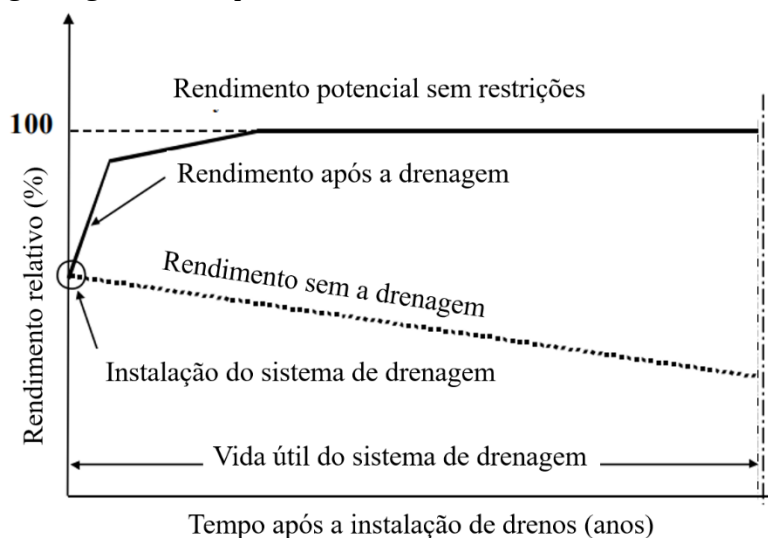
Já quanto à qualidade do sistema solo, o excesso de água reduz as forças de coesão que atuam entre as partículas do solo, diminuindo sua resistência à compressão e facilitando sua compactação até certo ponto. Solos compactados apresentam problemas de permeabilidade, aeração, disponibilidade de nutrientes e água, o que compromete a produtividade agrícola (Assis *et al.*, 2009; Hillel, 1998b; Sion; Shoop; McDonald, 2022). Tal condição pode limitar operações no campo como o plantio direto, aplicação de agroquímicos e tráfego de maquinários (Pittelkow *et al.*, 2015; Strock *et al.*, 2018; Valipour *et al.*, 2020).

A drenagem proporciona benefícios econômicos, ambientais e de saúde pública, com impactos que podem ser diretos e coletivos, ou indiretos e específicos ao agricultor. Entre os benefícios diretos, estão o bem-estar da comunidade rural, a sustentabilidade dos recursos naturais e o fortalecimento da economia nacional. Já entre os benefícios indiretos, observam-se o aumento da produtividade agrícola, a diversificação e intensificação das culturas, a preservação da fertilidade do solo e a otimização do uso de insumos (Abdel-Dayem, 2000; Yannopoulos *et al.*, 2020).

No entanto, a drenagem mal planejada de áreas de várzeas para exploração agrícola ou ocupação urbana pode, dentro de um contexto geral, gerar impactos ambientais e sociais negativos, especialmente para as populações ribeirinhas. Várzeas são áreas marginais a cursos d'água que estão sujeitas a enchentes e inundações periódicas, possuindo um ecossistema rico e complexo, solos naturalmente férteis, alta produção de biomas e elevada relevância na cadeia alimentar aquática. Dessa forma, sua exploração ou ocupação pode ocasionar desequilíbrios ecológicos, como a redução da disponibilidade alimentar da fauna aquática, além de riscos sociais, como enchentes e alagamentos em áreas habitacionais (Candiotto; Vargas, 2018; Costa *et al.*, 2016a; Gonçalves; Brasil, 2016; Teles, 2020).

De forma semelhante, Abdel-Dayem, Abdel-Gawad e Fahmy (2007) enfatizam que a prática da drenagem artificial em áreas severamente afetadas pela salinização ou em solos com umidade acima da capacidade de campo tende a resultar em um incremento médio de 10 a 30% da produtividade das culturas, como ilustrado na Figura 1.2.

Figura 1.2 - Tendência do rendimento das culturas ao longo dos anos com e sem o emprego de drenagem agrícola adequada.



Fonte: adaptado de Abdel-Dayem (2000).

No entanto, a drenagem excessiva de um solo, seja natural ou artificial, pode ocasionar impactos econômicos e ambientais negativos, como a redução da quantidade de água e nutrientes disponíveis no solo para as culturas e, ainda, a lixiviação indesejada de alguns sais, nutrientes e agroquímicos, o que pode contribuir para o processo de contaminação e eutrofização das águas subterrâneas e superficiais (Badiou; Page; Akinremi, 2018; Filipović *et al.*, 2023; Vymazal; Brezinová, 2018; Zajíček *et al.*, 2022). Gramlich *et al.* (2018) discorrem que a drenagem influencia não apenas o equilíbrio hídrico de uma paisagem, mas também a

suscetibilidade à erosão, ciclagem e transportes de nutrientes e outros elementos químicos muitas vezes nocivos a fauna e flora e a emissão de gases do efeito estufa e, por isso, sua correta gestão e manejo são fundamentais para que os possíveis impactos negativos dessa técnica sejam minimizados ou até mesmo evitados.

1.2.2 Métodos, sistemas e delineamento da drenagem

Existem basicamente dois métodos pelos quais a drenagem agrícola pode ser realizada: o superficial e o subterrâneo, os quais, de maneira sucinta, se diferem pelo local onde ocorre a interceptação e redirecionamento do excesso de água no solo. A escolha do método mais adequado depende dos problemas a serem mitigados e ou evitados, das propriedades do solo, das características climáticas e dos recursos disponíveis, havendo, ainda, a possibilidade do uso separado ou concomitante de ambos os processos em uma mesma área (Elnashar *et al.*, 2022; Islam *et al.*, 2022; Mariño; Luthin, 1982; Singh, 2019; Yannopoulos *et al.*, 2020; Zajíček *et al.*, 2022).

Em solos argilosos, onde o movimento da água é reduzido e a condutividade hidráulica do solo é baixa, a drenagem superficial tende a ser mais eficiente que a drenagem subterrânea (Abdel-Dayem; Abdel-Gawad; Fahmy, 2007; Bastawesy; Ali, 2013; Zhou; Guo, 2022). Em contrapartida, em áreas com problemas de salinização e lençol freático elevado, a drenagem subterrânea é priorizada (Akram *et al.*, 2013; Verma *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2022). Já em regiões de clima de monções, o uso conjugado desses métodos é quase imprescindível devido ao alto índice pluviométrico durante a época de chuvas e a prática da irrigação durante a estiagem (Islam *et al.*, 2022; Singh, 2019).

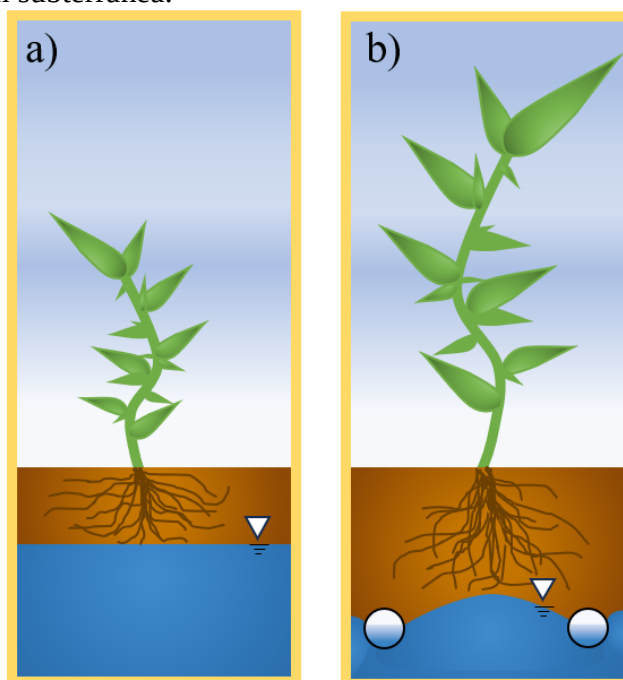
Em síntese, a drenagem superficial é indicada para locais onde a capacidade de infiltração do solo é inferior a intensidade de precipitação ou irrigação e onde há propensão à erosão hídrica (Singh, 2019; Zhou; Guo, 2022). Em áreas planas, onde a inclinação do terreno é inferior a 2%, esse método é empregado principalmente para evitar o alagamento da superfície do solo, enquanto em áreas mais íngremes, para o controle do escoamento superficial e de processos erosivos. Em ambos os casos, a coleta do excesso de água é normalmente realizada antes da saturação da zona radicular da cultura (Schultz; Zimmer; Vlotman, 2007; Singh, 2019).

Os sistemas de drenagem superficial podem ser classificados como naturais, com alteração do terreno e mistos. Os sistemas naturais direcionam a água de forma espontânea até um ponto de descarga, embora frequentemente sejam ineficientes em áreas de topografia muito plana. Os sistemas com modificação do terreno envolvem ajustes para melhorar a drenagem

natural, como aplainamento, sistematização e construção de camalhões ou sulcos. Por sua vez, os sistemas mistos combinam técnicas dos dois métodos, unindo a drenagem espontânea com intervenções para otimizar o escoamento (Schultz; Zimmer; Vlotman, 2007; Silva; Parfitt, 2004).

Enquanto a drenagem superficial elimina o excesso de água existente na superfície do solo antes que ocorra a saturação da zona radicular, a drenagem subterrânea rebaixa o nível do lençol freático de forma a proporcionar melhores condições para o desenvolvimento radicular da cultura, como mostrado na Figura 1.3 (Ritzema *et al.*, 2023; Singh, 2019; Wit *et al.*, 2022; Xian *et al.*, 2017). Esse método é considerado adequado para a gestão do solo principalmente quando em estado salino e para a manutenção do equilíbrio das águas subterrâneas em áreas de lençol freático alto, sobretudo em zonas agrícolas (Askri; Khodmi; Bouhlila, 2022; Tiwari; Goel, 2017; Verma *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2022).

Figura 1.3 - Representação esquemática do lençol freático em um solo sem drenagem e com drenagem subterrânea.

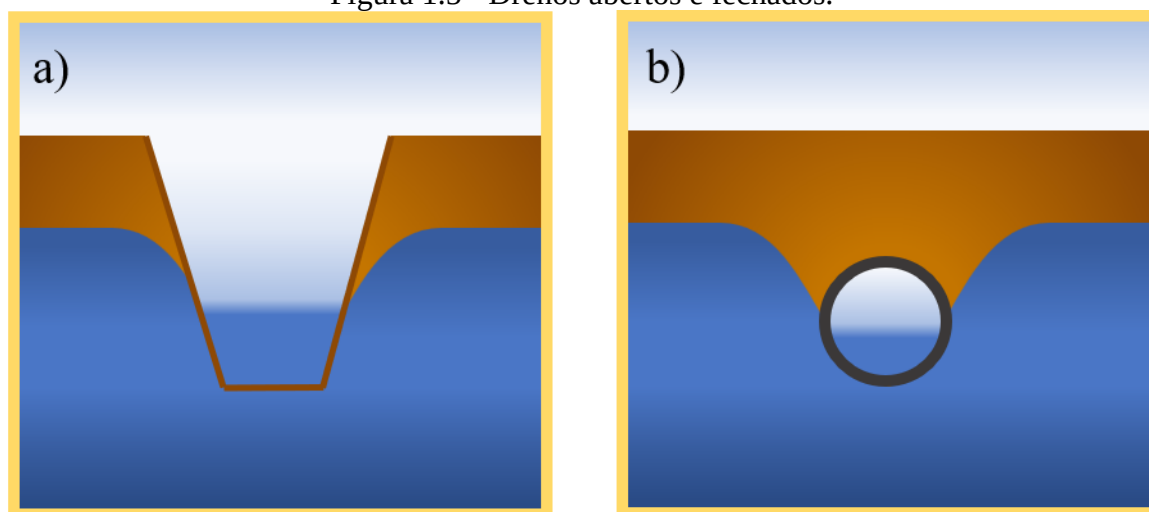


Fonte: do autor (2025), adaptado de Silveira (2016).

A prática da drenagem subterrânea foi iniciada em áreas com clima úmido para fins de controle do nível do lençol freático, sendo seu uso posteriormente difundido em áreas áridas e semiáridas como parte essencial dos sistemas de agricultura irrigada. Esse método é considerado uma das únicas formas de manejo de longo prazo capazes de recuperar e/ou evitar

Os drenos agrícolas podem, basicamente, ser tipificados em abertos ou fechados (Figura 1.5). Os chamados drenos abertos, a céu aberto ou canais de terra, são valas escavadas no solo que podem possuir diferentes formatos e tamanhos, sendo o mais comum o trapezoidal. São utilizados majoritariamente em regiões úmidas e apresentam a dupla finalidade de coletar e transportar a água, tanto superficial quanto subterrânea. No entanto, sua utilização é mais favorável à drenagem superficial ou em projetos onde a intensidade de precipitação é tão alta que a capacidade da drenagem por meio de condutos fechados se torna insuficiente ou economicamente inviável (Gilja; Harasti; Fliszar, 2021; Jafari; Salmasi; Abraham, 2019; Kramer *et al.*, 2019; Schultz; Zimmer; Vlotman, 2007; Yannopoulos *et al.*, 2020).

Figura 1.5 - Drenos abertos e fechados.



Fonte: do autor (2025), adaptado de UFRRJ, [s.d.].

Já os drenos fechados, subterrâneos ou tubulares, são condutos enterrados com perfurações ou espaços livres que formam pequenas galerias ou orifícios por onde a água entra no sistema. Esses drenos têm a função de coletar e conduzir a água subterrânea e podem ser fabricados em diferentes materiais como concreto, cerâmica e plástico liso ou corrugado. Atualmente, o dreno mais comercializado é o corrugado em Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Este material é atóxico, resistente, flexível, reciclável, leve, de longa durabilidade, fácil transporte e instalação e o que apresenta melhor custo-benefício do mercado (Jafari; Salmasi; Abraham, 2019; Silveira, 2016; Tiwari; Goel, 2017; Vicente, 2021).

Comparativamente aos drenos fechados, os drenos abertos apresentam vantagens como a simplicidade do sistema e a possibilidade de visualização de seu funcionamento. No entanto, sua instalação implica nas aberturas de valas, o que além de reduzir a área disponível para o cultivo, restringe muitas operações e o tráfego de máquinas agrícolas. Drenos abertos também

requerem manutenção constante, principalmente para controle do assoreamento e do crescimento de ervas daninhas nos taludes (Askri; Khodmi; Bouhlila, 2022; Khalil *et al.*, 2021; Qian *et al.*, 2021; Silveira, 2016; Singh, 2019).

Em relação aos drenos subterrâneos, suas principais limitações estão relacionadas à redução do desempenho do sistema devido a obstrução das tubulações. Esse fenômeno pode ocorrer devido à uma série de fatores como o processo de lixiviação, assoreamento, acúmulo de partículas sólidas na seção transversal do tubo, colmatção química e/ou biológica, penetração de raízes de plantas nos orifícios ou instalação inadequada das tubulações (Alavi *et al.*, 2021; Askri; Khodmi; Bouhlila, 2022; Bahçeci *et al.*, 2018; Ghane *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2023; Qian *et al.*, 2021; Ribeiro *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022). De acordo com Gaj e Madramootoo (2021), os tubos corrugados utilizados na drenagem subterrânea normalmente apresentam diâmetro entre 75 e 100 mm.

A verificação dos tubos de drenagem instalados sob o solo é de difícil detecção (Freeland *et al.*, 2019). Allred *et al.* (2020) e Kayad *et al.* (2020) comentam que com o passar do tempo, os sistemas enterrados precisam de manutenção ou substituição de suas partes para que a eficiência do projeto seja mantida. Para isso, os autores dizem ser necessário que o agricultor tenha em mãos um mapa das linhas pré-existentes dos tubos de drenagem e, na maioria dos casos, este mapa já não está mais disponível, o que torna uma tarefa de simples feito em um trabalho complexo e oneroso.

Quanto a distribuição da rede de drenagem na área do projeto, esta é complexa e acontece, principalmente, em função da topografia do terreno. Em sistemas de drenagem do tipo natural, os drenos devem ser instalados nas partes mais baixas do terreno, preferencialmente no local por onde a água escoar espontaneamente durante o período chuvoso. Em áreas grandes, é necessário construir uma rede de drenos paralelos, os quais podem ser dispostos em forma de espinha de peixe se o terreno apresentar declividade apenas em um sentido, ou em forma de grade se o terreno apresentar declividade em dois sentidos. Já em áreas planas, os drenos devem ser instalados em forma de grades paralelas. Nesse caso, se a área possuir declividade em dois sentidos, os drenos laterais devem descarregar apenas em um lado do coletor. Entretanto, se a declividade da área for baixa e apenas em um sentido, os drenos laterais devem descarregar em ambos os lados do coletor. Existe, ainda, a possibilidade do delineamento híbrido, que une os sistemas de drenagem em forma de espinha de peixe e em paralelo (Freeland *et al.*, 2019; Mantovani; Bernando; Palaretti, 2007; Rudi; Bailly; Vinatier, 2018).

Outro aspecto essencial a ser considerado nos projetos de drenagem com drenos abertos é a capacidade de armazenamento da rede. Uma descarga hídrica maior do que a suportada pelo sistema resulta no transbordamento da água, o que aumenta a umidade do solo, provoca inundações e pode, conseqüentemente, reduzir a produtividade agrícola. Nesse sentido, o crescimento desordenado da vegetação nos taludes dos canais ou valetas pode contribuir para que essa capacidade seja reduzida. Além disso, esse fenômeno é capaz de influenciar a velocidade do fluxo e da turbulência da solução drenada e a rugosidade do leito e das margens do canal, o que pode reduzir o desempenho da rede de drenagem como um todo (Cucchiari *et al.*, 2021; Lubis, 2021; Rudi; Bailly; Vinatier, 2018; Singh, 2019).

1.2.3 Uso de envoltório em tubos de drenagem

O envoltório de drenagem pode ser entendido como um termo genérico utilizado para designar qualquer material permeável que é disposto ao redor dos drenos subterrâneos no intuito de melhorar o desempenho do sistema de drenagem (Adnan *et al.*, 2021; Alhaddad; Naji, 2019; Byrne *et al.*, 2023a; Guo-Quan *et al.*, 2022; Yannopoulos *et al.*, 2020). De acordo com Cavelaars, Vlotman e Spoor (1994) e Ritzema, Nijland e Croon (2006), os envoltórios apresentam três funções básicas: restringir o carreamento de partículas sólidas gerados pela erosão subterrânea para o interior das tubulações para prevenir os problemas relacionados à obstrução dos drenos (Figura 1.6); propiciar boas condições de permeabilidade na interface solo-dreno para que a resistência de entrada da água do solo para o dreno seja mínima e, em alguns casos, fornecer suporte físico às tubulações para evitar danos e deformações devido à carga do solo.

Figura 1.6 - Drenos subterrâneos obstruídos devido ao carreamento de partículas sólidas que se acumularam no interior das tubulações.



Fonte: Ghane (2022b).

Os envoltórios precisam, necessariamente, ser mais permeáveis que o solo a ser drenado e capazes de manter as partículas do solo o mais estático possível, evitando o carreamento delas para o interior do sistema. Além disso, devem apresentar boa resistência mecânica para prevenir problemas de abrasão, rasgos e deformações durante a instalação, bem como resistência a processos de deterioração química e biológica, assegurando uma durabilidade satisfatória. Além disso, precisam apresentar características hidrofílicas para que o fluxo da solução a ser drenada para dentro do sistema seja uniforme e de baixa resistência mesmo sob baixos gradientes hidráulicos (Alavi *et al.*, 2021; Alhaddad; Naji, 2019; Khorramian *et al.*, 2020; Rollin; Broughton; Bolduc, 1987).

Em resumo, para ser considerado eficiente, um envoltório deve apresentar alta permeabilidade, boa durabilidade e baixa resistência de entrada, e pode ser do tipo mineral, orgânico ou sintético. No geral, os materiais minerais são granulares e incluem o cascalho, brita, areia grossa, escória e argila queimada. Apresentam vida útil longa, no entanto, são volumosos e seu transporte é oneroso, o que pode dificultar e eleva o valor econômico de sua instalação. Além disso, ao longo do tempo, pode ser que sofram dissociação e solubilização (Bahçeci *et al.*, 2018; Ding; Chang, 2020; Ghane, 2022a; Guo *et al.*, 2020; Stuyt; Dierickx, 2006; Vicente, 2021; Vlotman; Willardson; Dierickx, 2001).

Quanto aos materiais orgânicos, estes tendem a ser fibras vegetais ou resíduos orgânicos, como turfas, hastes de linho, fibras de coco, palha de cereais e lascas de madeira. Estes envoltórios apresentam baixo custo, no entanto, possuem baixa vida útil devido à sua rápida degradação em função da presença de microrganismos no solo e outros fatores como pH, umidade, temperatura entre outros, o que faz com que estes não se adaptem a qualquer tipo de solo (Alhaddad; Naji, 2019; Bahçeci *et al.*, 2018; Ghane, 2022a; Khorramian *et al.*, 2020; Vicente, 2021; Vlotman; Willardson; Dierickx, 2001).

As limitações dos materiais drenantes minerais e orgânicos fazem com que o uso do envoltório sintético seja cada vez mais comum na drenagem agrícola. Este material, apesar de fino e leve, apresenta alta resistência, durabilidade e êxito nos processos de filtração, drenagem, proteção, separação e suporte às partes do sistema em relação às cargas do solo. Além disso, possuem boa adaptabilidade a diversos tipos de solo (Adnan *et al.*, 2021; Alavi *et al.*, 2021; Alhaddad; Naji, 2019; Ghane, 2022a; Yannopoulos *et al.*, 2020).

Os envoltórios sintéticos podem ser especificados em duas categorias: envolturas soltas de fibras sintéticas ou mantas de geotêxtil, que envolvem a seção longitudinal do dreno. Dentre essas opções, destaca-se o uso da manta geotêxtil, devido, principalmente, sua praticidade em

relação a portabilidade e instalação. Este material é comumente fabricado em poliéster ou polipropileno, e de acordo com seu processo de fabricação, pode ser em três tipos: tecido, que é fabricado pelo entrelaçamento de fios de fibras sintéticas, oferecendo alta resistência; não tecido, produzido pela aglutinação das fibras, destacando-se pela flexibilidade e capacidade de filtragem; e malha, que possui uma estrutura mais aberta, favorecendo a drenagem, mas com menor resistência mecânica (Byrne *et al.*, 2023b; Ding; Chang, 2020; Ghane, 2022a; Stuyt; Dierickx, 2006; Yannopoulos *et al.*, 2020).

A principal limitação dos envoltórios sintéticos está relacionada a seu custo que, apesar de inferior ao dos envoltórios minerais, eleva expressivamente o valor do sistema de drenagem (Adnan *et al.*, 2021; Alavi *et al.*, 2021; Bahçeci *et al.*, 2018; Kaboosi; Liaghat; Hosseini, 2012; Stuyt; Dierickx; Beltrán, 2005). É importante salientar, no entanto, que a substituição do envoltório de cascalho pelo sintético pode permitir uma redução de 50% dos custos relacionados aos materiais drenantes (Abdel-Dayem; Abdel-Gawad; Fahmy, 2007).

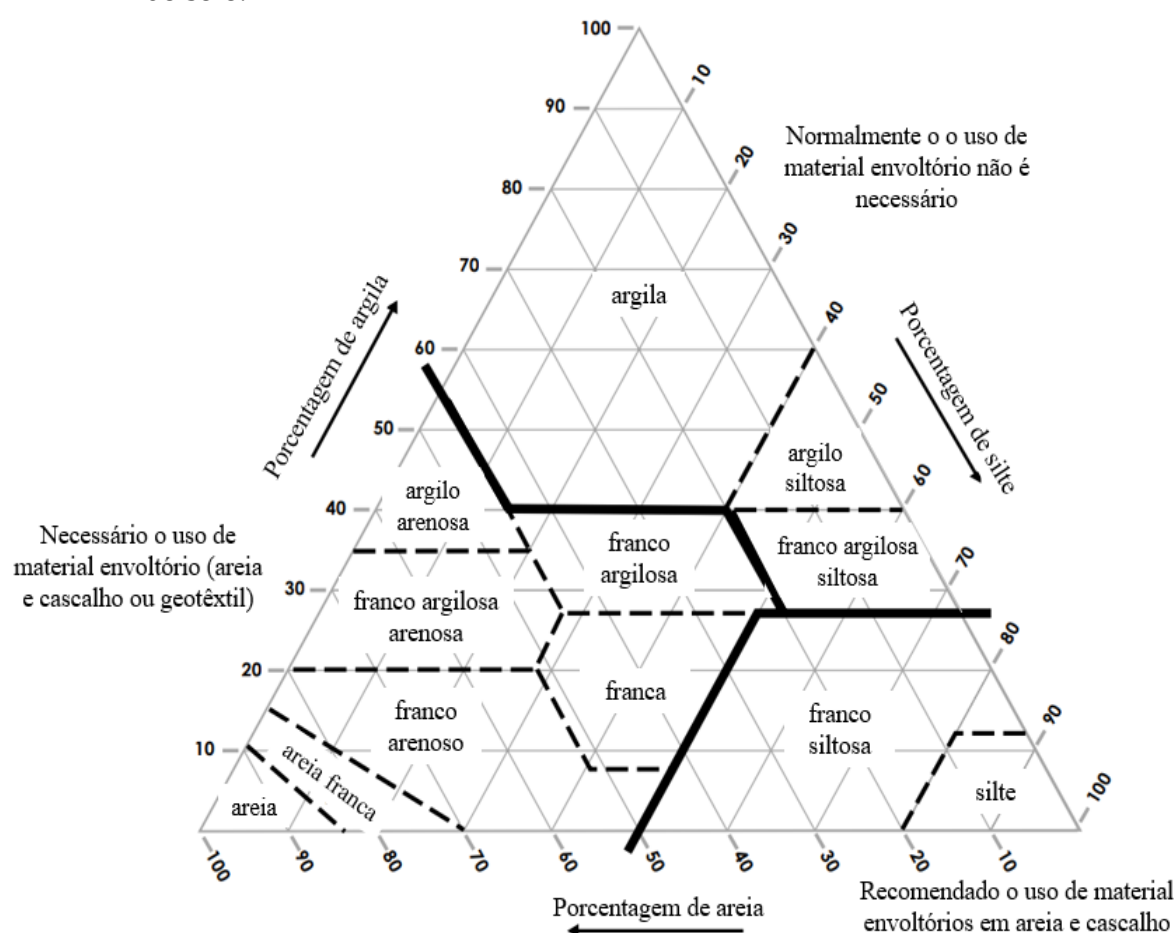
Ressalta-se que a avaliação da necessidade do uso de material envoltório ao redor dos drenos é um dos aspectos mais relevantes a serem considerados em um projeto de drenagem subterrânea. Isso porque essa decisão influencia tanto na questão econômica quanto na durabilidade e efetividade dos sistemas (Byrne *et al.*, 2023b; Ding; Chang, 2020; Ghane, 2022c; Guo *et al.*, 2020; Khorramian *et al.*, 2020).

De acordo com Dierickx e Yuncuoglu (1982), Alavi *et al.* (2021) e Ghane *et al.* (2022), os requisitos do uso do envoltório são determinados, basicamente, a partir da coesão e estabilidade estrutural do solo na profundidade de instalação dos drenos. Os autores ressaltam que, geralmente, solos instáveis e de baixa coesão, como os arenosos, exigem o uso de envoltório, enquanto os solos com alta estabilidade e coesão, como os muito argilosos, não. Nos solos intermediários, é preciso realizar uma análise dessa correlação.

O fato é que solos com altos teores de silte e areia fina e baixo teor de argila apresentam uma quantidade insuficiente de argila para serem coesos o bastante para se manterem estruturalmente estáveis. Além disso, as partículas deste tipo de solo tendem a não ser grandes o suficiente para formarem uma estrutura estável sobre as ranhuras dos drenos ou sobre os poros do material envoltório, o que possibilita o seu arraste para o interior das tubulações. Uma vez dentro dos drenos, as partículas sólidas tendem a se acumular próximo ao ponto de entrada o que, a longo prazo, pode provocar a obstrução das ranhuras e o assoreamento das tubulações (Alavi *et al.*, 2021; Bahçeci *et al.*, 2018; Cavelaars; Vlotman; Spoor, 1994; Ghane, 2022b; Stuyt; Dierickx; Beltrán, 2005).

Gallichand e Marcotte (1993) sintetizam que o uso de material envoltório é indicado em áreas onde o teor de argila do solo é inferior a um limite que varia conforme a localização geográfica, condições climáticas e propriedades físico-hídricas do solo (Figura 1.7). Nesse sentido, o conhecimento da textura do solo, entendido como a porcentagem de areia, silte e argila, é de fundamental relevância para compreensão do comportamento e manejo do solo nos projetos de drenagem (Bahçeci *et al.*, 2018; Byrne *et al.*, 2023a, 2023b; Guo *et al.*, 2020; Verma *et al.*, 2022).

Figura 1.7 - Recomendações do uso de material envoltório em função das diferentes texturas do solo.



Fonte: Adaptado de NRCS (2001).

Após identificada a necessidade do emprego de envoltório, é preciso avaliar a adequabilidade do uso cada material. Em solos siltosos com distribuição granulométrica desuniforme e gradiente hidráulico elevado, por exemplo, o uso de geotêxtil não é recomendado devido as altas probabilidade de sofrerem colmatção e, por isso, o uso de envoltório mineral, como areia e cascalho, deve ser priorizado. Em síntese, o fenômeno de colmatção acontece devido a obstrução dos vazios existentes entre os fios poliméricos que compõem este material,

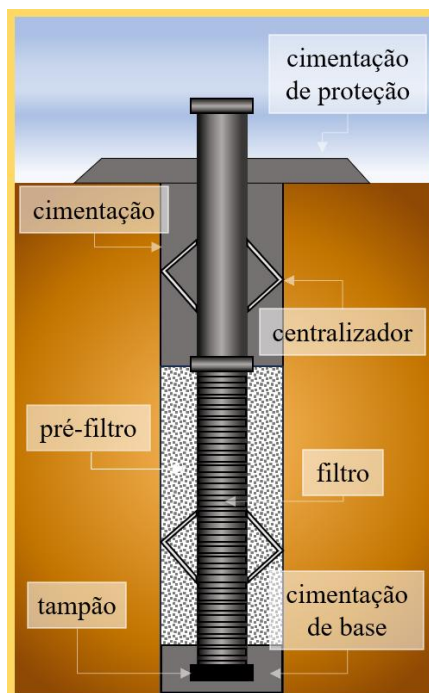
o que acontece em função do depósito de sólidos que são carregados pelo movimento da água no solo, o que dificulta a passagem de líquidos e, conseqüentemente, reduz sua permeabilidade e o desempenho do sistema de drenagem (NRCS, 2001).

O fato é que o uso de um envoltório drenante ao redor dos drenos subterrâneos adiciona custos ao sistema, seja devido à aquisição, transporte, instalação ou manutenção/substituição destes (Bahçeci *et al.*, 2018; Byrne *et al.*, 2023b; Khorramian *et al.*, 2020). Stuyt, Dierickx e Beltrán (2005) apontam que o preço relativo de 1 m de envoltório drenante, mesmo o mais barato como o orgânico e desprezando os custos referentes à sua instalação e transporte, equivale, em média, ao preço de 1 m de dreno em PVC corrugado com diâmetro igual a 60 mm.

Ressalta-se ainda, que tubos utilizados em poços subterrâneos são, de certa forma, semelhantes aos tubos utilizados em sistemas de drenagem subterrânea. Dessa forma, a NBR 12212 (ABNT, 1992), fixa diretrizes em que o uso de pré-filtro em projetos de poço de captação de água subterrânea para fins de abastecimento público é necessário, pode ser apontada como uma diretriz para avaliar a necessidade do uso de material envoltório em sistemas de drenagem subterrâneo. De acordo com a norma, entende-se como filtro a tubulação ranhurada que é instalada dentro do poço com o objetivo de permitir a passagem da água do aquífero para o poço sem que aconteça perdas de carga excessivas e restringir a movimentação de partículas finas para dentro do sistema durante o bombeamento e ainda, atuar como suporte estrutural para o poço (ABNT, 1992; Cardoso, 2016; Costa Filho *et al.*, 1998). Entende-se, portanto, que o filtro equivale ao dreno, enquanto o pré-filtro equivale ao envoltório.

Assim, o pré-filtro é entendido como o preenchimento granulado mineral, geralmente em areia, que é disposto entre a superfície externa do filtro/tubulação de revestimento e a parede do poço. Esta camada atua como um envoltório permeável e é utilizada com o intuito de estabilizar as partículas sólidas do aquífero por meio do aumento do diâmetro efetivo e da área de captação do poço, o que faz que a velocidade de entrada da água e as perdas por fricção sejam reduzidas e evita colapsos sobre o filtro, aumentando a vida útil do poço (ABNT, 1992; Cardoso, 2016; Costa Filho *et al.*, 1998). A esquematização de um poço subterrâneo pode ser visualizada na Figura 1.8.

Figura 1.8 - Poço tubular subterrâneo.



Fonte: do autor (2025), adaptado de Costa Filho et al. (1998).

A NBR 12212 estabelece que poços cuja zona de saturação a ser usufruída estiver localizada em aquíferos não consolidados devem dispor de filtros. Além disso, é designado que em casos de aquíferos com granulometrias diferentes, presença indesejada do fenômeno de sufusão - anomalia no fluxo hídrico que ocorre devido ao afluxo preferencial da água em cavidades naturais ou acidentais, carreamentos de partículas finas e obstrução dos filtros, deve-se complementar os filtros com pré-filtro (ABNT, 1992).

Nos casos de instalação de material filtrante sem pré-filtro, é exigido que as aberturas do filtro retenham de 30 a 40% das partículas sólidas nos casos em que o coeficiente de uniformidade das partículas do aquífero for maior que 6,0; e de 40 a 50% quando o coeficiente for menor que 6,0. Ademais, é fixado que as ranhuras do filtro, com pré-filtro, devem ser de tal maneira que retenham 90% do material do aquífero. O coeficiente de uniformidade é um parâmetro que pode ser obtido pela curva de distribuição granulométrica, sendo entendido como a razão entre o diâmetro da peneira na qual 60% da massa da amostra de solo passa no peneiramento e o diâmetro efetivo, que indica o diâmetro da peneira em que apenas 10% da massa da amostra do solo é passante (ABNT, 1992).

Segundo Vertematti e Aguiar (1977), o primeiro estudo racional para o dimensionamento de filtros de proteção foi realizado por Terzaghi em 1920, durante a análise de estruturas de fundação de barragens rompidas por "piping". Posteriormente, esses critérios

foram validados em laboratório por Bertram, em 1940, sob a orientação de Casagrande. Esse método, conhecido como critério Bertram-Terzaghi, estabelece duas diretrizes essenciais para o dimensionamento de filtros de proteção, garantindo que o material utilizado permita a passagem da água sem arrastar partículas do solo. O primeiro critério determina que os vazios do filtro não podem ser excessivamente grandes, ou seja, o diâmetro dos poros do material filtrante, correspondente a 15% de passagem na curva granulométrica (D_{15F}), deve ser, no máximo, de quatro a cinco vezes o diâmetro das partículas do solo para as quais 85% da sua massa passa através de uma peneira (D_{85S}). Ou seja, D_{15F} refere-se ao diâmetro dos poros do material filtrante que permite a passagem de 15% da massa do solo em questão, e D_{85S} refere-se ao diâmetro das partículas do solo para as quais 85% da massa do solo passa pela abertura da malha de uma peneira. Caso essa relação seja maior, há risco de erosão interna, permitindo o deslocamento das partículas do solo através do filtro, o que compromete sua estabilidade. Já o segundo critério estabelece que os vazios do filtro precisam ser suficientemente grandes para garantir a drenagem eficiente, ou seja, D_{15F} deve ser, no mínimo, quatro a cinco vezes maior que D_{15S} (entendido como o diâmetro das partículas do solo para as quais 15% da sua massa passa através de uma peneira), caso contrário, o filtro pode restringir excessivamente a passagem da água e reduzir sua eficiência. Por fim, Bertram (1940) concluiu nesse estudo que os critérios de dimensionamento do filtro são praticamente independentes do formato dos grãos do solo.

De forma análoga, o U.S. Army Corps of Engineers (1941) também estabeleceu critérios para determinar o diâmetro limite dos poros do material filtrante, visando a estabilização do solo e a prevenção da penetração de sólidos em um tubo com orifícios. Nesse estudo, concluiu-se que as partículas finas do solo não atravessam o material filtrante quando o D_{15F} é inferior a cinco vezes o D_{85S} do solo. Além disso, para evitar o carreamento de partículas, as partículas correspondentes a D_{85S} devem ser maiores ou iguais à abertura da malha do tubo perfurado, garantindo a estabilidade do solo adjacente ao filtro (Vertematti; Aguiar, 1977). Ambos os estudos apresentam critérios semelhantes, com o intuito de assegurar a eficiência e a estabilidade dos sistemas de filtragem, prevenindo o deslocamento de partículas e a erosão interna.

Nesse sentido, como alternativa mais econômica, algumas indústrias especializadas em drenagem nos Estados Unidos e Canadá iniciaram a produção de tubos de drenagem denominados *sand-slot pipes*. Esses tubos apresentam ranhuras tão estreitas, com larguras próximas a 0,38 mm, que a velocidade de entrada da água do solo para o dreno torna-se baixa e, por isso, o arraste de sólidos para o interior dos tubos é mínimo ou até mesmo inexistente, o

que faz com que o uso de envoltório seja dispensado. Além disso, diferentemente dos drenos tradicionais que geralmente apresentam orifícios no formato retangular ou oval, os orifícios destes drenos são conhecidos como *knife-cut*, devido a sua semelhança com o aspecto de um corte em plástico feito com faca (Ghane, 2022a).

Ghane (2022b) discorre que, normalmente, a drenagem subterrânea com envoltório permite colheitas quantitativamente maiores, enquanto a drenagem com *sand-slot pipes* possibilita maior economia em relação ao custo unitário do sistema de drenagem. No entanto, o mesmo autor ressalta que o custo/benefício da drenagem artificial é um fator complexo e singular que depende de diversos fatores como o solo, clima, profundidade e espaçamento de instalação do dreno, rendimento e preço da cultura e os custos e tecnologias das tubulações. Dessa forma, a busca por inovações e pesquisas locais referentes aos sistemas de drenagem subterrânea não deve cessar.

1.2.4 Propriedades físicas e hidráulicas do solo que influenciam a drenagem

1.2.4.1 Potencial total de água no solo e Lei de Darcy

A retenção e o movimento da água no solo, bem como sua absorção pelas plantas e transferência para a atmosfera, são fenômenos associados à energia. Existem diferentes formas de energia a que todo corpo pode estar naturalmente submetido, e dentre elas destacam-se a cinética, ou de movimento, e a potencial, ou de posição. No entanto, dentro do sistema solo-planta-atmosfera, o movimento da água tende a ser tão lento que a componente relacionada à energia cinética é quase sempre desprezível em relação às componentes da energia potencial (Aldaz-Lusarreta *et al.*, 2022; Einav; Liu, 2022; Or; Tuller; Wraith, 2023; Reichardt; Timm, 2012; Smagin, 2021).

A energia potencial pode ser definida como a energia que um corpo possui devido à sua posição ou configuração em relação a um campo de força no Universo, e que pode ser liberada ou transformada quando o sistema sofre uma mudança. Em função do objeto a ser estudado e dos campos de força presentes, um ou mais tipos de energia potencial podem estar atuando concomitante sobre o sistema e, no caso da água ou solução no solo, os componentes da energia potencial que podem influenciar o sistema são o mátrico, osmótico, de pressão e gravitacional (Novick *et al.*, 2022; Or; Tuller; Wraith, 2023; Reichardt; Timm, 2012).

O potencial mátrico é o componente resultante da combinação entre as forças que envolvem a matriz sólida de um solo (granulometria, estrutura e poros) e a água, como as forças capilares e de adsorção. Está diretamente relacionado com o conteúdo de água no solo, sendo que, quanto menor a umidade do meio poroso, menor será seu potencial e maior será a energia necessária para que se consiga remover a água retida no solo. É uma tensão com valores negativos (Novick *et al.*, 2022; Or; Tuller; Wraith, 2023; Reichardt; Timm, 2012).

Já a componente osmótica é atribuída à presença de sais minerais e outros solutos na água, que fazem com que a água fique sob sua influência. No entanto, nos estudos quantitativos do movimento da água no solo na fase líquida, que é o tema da presente pesquisa, este potencial é comumente desprezado uma vez que a variação da concentração dos solutos presente no solo tende a ser mínima e não há presença de membrana semipermeável. Ressalta-se, no entanto, que nos estudos relacionados aos sistemas vegetais, este componente é de extrema relevância por atuar na penetração espontânea da água para dentro das células das plantas (Novick *et al.*, 2022; Or; Tuller; Wraith, 2023; Reichardt; Timm, 2012).

O potencial de pressão é o componente resultante da pressão hidrostática exercida por uma coluna de água em um solo saturado. Está presente apenas quando a pressão atuante sobre a água no solo é superior a pressão atmosférica, assumindo um valor positivo (Novick *et al.*, 2022; Or; Tuller; Wraith, 2023; Reichardt; Timm, 2012).

Por fim, o potencial gravitacional, oriundo do campo de força gravitacional da Terra, é determinado em função da posição relativa do plano de referência estabelecido, recebendo valores positivos quando acima e negativos quando abaixo da referência estabelecida. Está sempre presente e pode ser definido como o trabalho necessário para manter um corpo suspenso em um ponto específico em relação a atração da gravidade (Novick *et al.*, 2022; Or; Tuller; Wraith, 2023; Reichardt; Timm, 2012).

Por definição, a soma das diferentes energias potenciais que atuam de forma concomitante sobre o sistema é denominada potencial total da água no solo. Já a soma dos componentes mátrico, de pressão e gravitacional, é comumente designada como potencial hidráulico da água no solo – H , sendo utilizada para estudar o movimento de água para os drenos (Easton; Bock, 2016; Einav; Liu, 2022; Li *et al.*, 2021; Or; Tuller; Wraith, 2023; Reichardt; Timm, 2012; Sadeghi; Darzi, 2023; Santos *et al.*, 2022).

Como qualquer corpo no Universo, a água ou solução no solo tende a assumir espontaneamente seu estado de energia mínima e sendo assim, sempre que houver diferença de potencial total entre dois pontos, haverá movimento da água no solo. Via de regra, esses movimentos acontecem no sentido do decréscimo de energia, isto é, a água fluirá de um ponto

de maior potencial total para um de menor. A razão entre a diferença de potencial entre dois pontos e a distância entre eles é denominada gradiente de potencial total, ou ainda, gradiente hidráulico. Ressalta-se que a água pode mover-se no solo em qualquer sentido e direção, desde que não haja uma camada de impedimento impermeável, o que ocorre de acordo com a distribuição dos potenciais de água no solo e dos gradientes gerados (Easton; Bock, 2016; Hillel, 1998a; Novick *et al.*, 2022; Or; Tuller; Wraith, 2023; Reichardt; Timm, 2012).

Quando a água livre se movimenta no solo, ela é submetida a diferentes intensidades de forças de retenção exercidas pelo meio poroso. Em condições de menor intensidade dessas forças, a água pode se desprender naturalmente, movendo-se sob a ação da gravidade. No entanto, quando a força de retenção é mais intensa, torna-se necessário fornecer energia externa para que a água se desprenda. O valor dessa energia por unidade de volume de água é denominado sucção do solo, que geralmente resulta da soma das parcelas de sucção matricial do meio poroso. A relação entre a sucção e o teor de água no solo é conhecida como curva característica de sucção ou curva de água no solo (Easton; Bock, 2016; Or; Tuller; Wraith, 2023).

Em 1856, Darcy por meio de uma série de estudos sobre infiltração em colunas verticais de areia saturadas com água, concluiu que a densidade de fluxo que passa por unidade de tempo e de área pelo meio poroso é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico da água nesse meio. A constante de proporcionalidade foi denominada pelo autor de “condutividade hidráulica do solo” e dessas afirmações foi originado a equação de Darcy (Buckingham, 1907; Fuentes; Chávez; Brambila, 2020; Gonçalves; Libardi, 2013; Mawlood; Adnan, 2020; Reichardt; Timm, 2012; Zhao; Gong, 2019).

A Lei de Darcy é válida para solos em condição de saturação e para escoamentos do tipo laminar, os quais ocorrem em grande parte dos solos naturais. Esse tipo de escoamento pode ser caracterizado como aquele em que as partículas do fluido se movem com um mínimo de agitação, em camadas paralelas, sem que haja mistura macroscópica com as camadas de fluido adjacentes. Em caso contrário, tem-se o escoamento do tipo turbulento. O fluxo da água no solo se dá em direção ao decréscimo do potencial hidráulico (Buckingham, 1907; Fuentes; Chávez; Brambila, 2020; Gonçalves; Libardi, 2013; Mawlood; Adnan, 2020; Reichardt; Timm, 2012; Zhao; Gong, 2019).

1.2.4.2 Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat})

A constante de proporcionalidade da equação de Darcy ou condutividade hidráulica do solo, representa uma propriedade que expressa a facilidade com que a água se movimenta através de um meio poroso. Sua determinação é de extrema relevância em diversas práticas agrícolas, como a irrigação e drenagem, e em estudos relacionados ao movimento de água e solutos no solo (Diminescu; Dumitran; Vuta, 2019; Gonçalves; Libardi, 2013; Mehdinejadiani; Fathi; Khodaverdillo, 2022; Zhang *et al.*, 2019; Zhang; Schaap, 2019).

A condutividade hidráulica é uma grandeza dependente das propriedades do fluido, como a viscosidade e densidade, e do solo, como a textura, estrutura e continuidade dos poros preenchidos por água (Chandel; Shankar, 2021; Mesquita; Moraes, 2004; Singh *et al.*, 2022). Por esse motivo, Centeno *et al.* (2020) e Brady (1983) afirmaram que qualquer fator que exerça influência sobre o tamanho e configuração dos poros do solo influenciará, conseqüentemente, este parâmetro. Gonçalves e Libardi (2013) enfatizaram que a condutividade hidráulica saturada é mais influenciada pela estrutura do que pela textura do meio poroso, sendo que quanto maior o grau de agregação de um solo, maior o valor desse coeficiente.

Portanto, a condutividade hidráulica é um parâmetro hidráulico de grande variabilidade espacial devido a própria heterogeneidade do solo, variando de um solo para outro e, ainda, para um mesmo tipo de solo com alterações em sua estrutura, nível de compactação, entre outros. De modo geral, quanto maior for o valor da condutividade hidráulica, maior será o fluxo no meio poroso, sendo seu índice máximo atingido quando o solo se encontra em estado de saturação (Centeno *et al.*, 2020; Mallants *et al.*, 2020; Rehman *et al.*, 2022; Reichardt; Timm, 2012; Ritzema, 2006).

Quando saturados, solos de textura arenosa tendem a apresentar uma condutividade hidráulica superior à de solos de textura fina. No entanto, quando insaturados, uma súbita mudança no intervalo de sucção é capaz de ocasionar uma brusca variação de umidade, o que pode ocasionar a redução considerável da condutividade hidráulica desse solo. Nessas condições, a condutividade hidráulica de solos finos pode ser superior à de solos arenosos (Reichardt; Timm, 2012; Ritzema, 2006).

1.2.4.3 Porosidade

Em função da estrutura do solo, ou seja, do arranjo espacial entre as partículas de areia, silte, argila e matéria orgânica, um dado volume de solo contém, além do volume de sólidos, um volume de poros. Os poros são cavidades de diferentes formas e tamanhos que podem formar espaços comunicantes ou não, que refletem diretamente na qualidade física do solo por

influenciarem nos processos de aeração, transferência e retenção de água, solutos e gases, desenvolvimento de microrganismos e resistência à penetração, e ramificação das raízes (Costa *et al.*, 2016; Guo-Quan *et al.*, 2022; Hillel, 1998b; Holbak *et al.*, 2021; Mateo-Marín *et al.*, 2021; Muzyka *et al.*, 2023; Reichardt; Timm, 2012).

Existem diversas classificações para os poros do solo, sendo a mais simples e comum a distinção entre micro e macroporos (Chavarria-Vidal; Miranda; Farias-Ramírez, 2020; Guo-Quan *et al.*, 2022; Jabro; Stevens, 2022; Lima *et al.*, 2022; Muzyka *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2022). De acordo com a classificação proposta por Brady e Weil (2013), os microporos, também denominados poros capilares, possuem diâmetro inferior a 50 μm e estão associados à capacidade de retenção e armazenamento de água e solutos no solo, sendo relevantes para a manutenção da umidade. Já os macroporos são os poros com diâmetro superior a 50 μm que estão relacionados aos processos de drenagem e aeração, sendo por onde a água e solutos transitam e percolam pela ação da gravidade. Além disso, diz-se que o solo se encontra saturado quando todos os seus poros estão preenchidos com água e não saturado, ou insaturado, quando seu espaço poroso está parcialmente preenchido por água e parcialmente preenchido por ar.

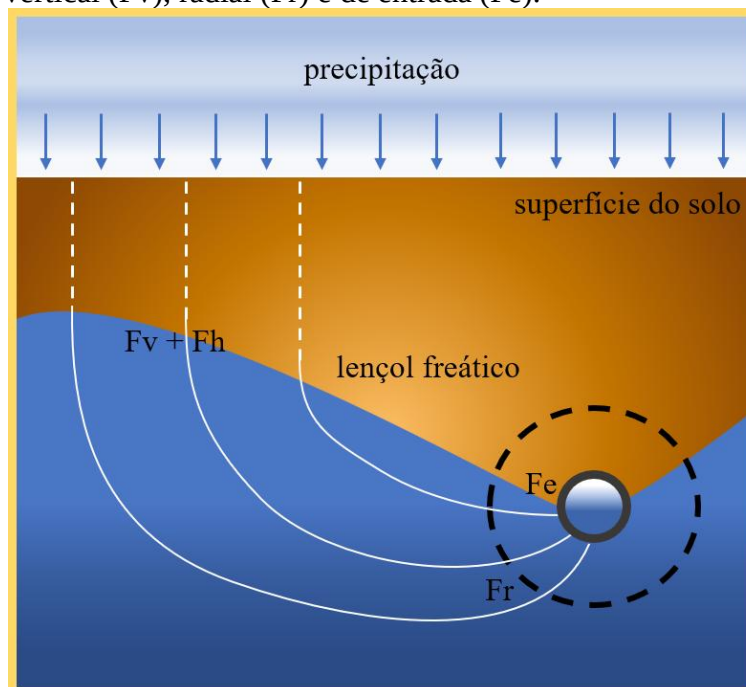
É importante distinguir que em irrigação de solos pesados, a capacidade de campo é o teor de água retido sob tensão de 0,33 bars, equivalente ao vácuo de 3,3 mca (metros de coluna de água). Já em solos arenosos ou muito agregados, com baixo teor de argila natural, a tensão seria de 0,06 a 0,10 bar, equivalente ao vácuo de 0,6 a 1,0 mca. Isso ocorre porque a capacidade de retenção de água no solo está diretamente relacionada à sua textura e estrutura. A profundidade típica de drenos dificilmente é maior que 2 metros, sendo muito comum em torno de 1,0 a 1,4 metros. Este fato impede que seja utilizado para cálculo da porosidade drenável a umidade retida à tensão de 3,3 mca (Reichardt; Timm, 2012).

Solos pesados, como os argilosos, possuem muitos microporos, que retêm água com maior facilidade, exigindo uma menor tensão para que a água seja retida nas condições de capacidade de campo. Já os solos arenosos, com poucos microporos e muitos macroporos, têm uma capacidade de retenção menor, o que faz com que a tensão necessária para reter a água seja maior. Isso significa que solos arenosos drenam rapidamente e retêm menos água, enquanto solos argilosos retêm mais água, favorecendo sua disponibilidade para as plantas. Cabe ressaltar que os latossolos com predominância de teores de ferro e alumínio apresentam agregação e cimentação das partículas de argila de modo que, embora tenham alto teor de argila, os agregados formados são relativamente grandes e esses solos acabam por exibir boa drenagem, com comportamento da condutividade hidráulica semelhante à de solos arenosos não compactados (Reichardt; Timm, 2012).

1.2.5 Rede de fluxo, perda de carga e resistência de entrada

A rede de fluxo de um sistema de drenagem subterrânea é composta por quatro componentes: um vertical, um horizontal, um radial e um de entrada. Esses componentes, também denominados linhas de fluxo ou de escoamento, representam a trajetória da água no solo em direção ao dreno. Os elementos vertical e horizontal referem-se, nesta ordem, ao fluxo descendente e horizontal da água do nível freático até as proximidades do dreno. Já as componentes radial e de entrada referem-se, respectivamente, ao fluxo de água que converge radialmente ao se aproximar das paredes do dreno e ao fluxo de passagem da água do solo para o interior do dreno (Figura 1.9) (Alhaddad; Naji, 2019; Ernst, 1954; Ghane *et al.*, 2022; Harr, 1962; Nozari; Azadi, 2017; Zheng; Stone, 2022).

Figura 1.9 - Redes de fluxo da água do solo em direção a um dreno subterrâneo: fluxo horizontal (F_h), vertical (F_v), radial (F_r) e de entrada (F_e).



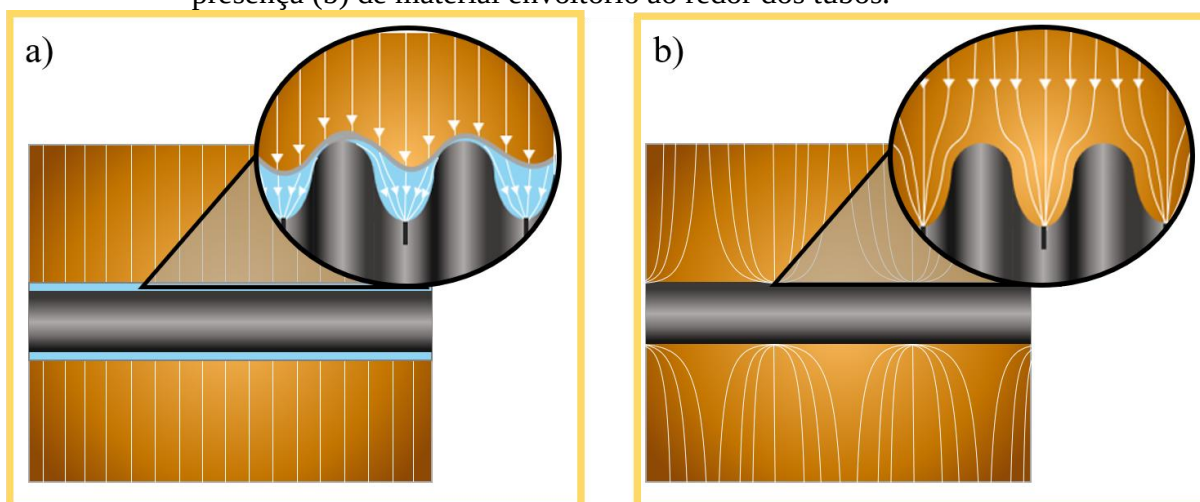
Fonte: do autor (2025), adaptado de Dierickx (1999).

Cada um dos componentes constituintes da rede de fluxo está sujeito a uma perda de carga hidráulica e a uma resistência específica correspondente. Sendo assim, a perda de carga total de um sistema de drenagem subterrâneo pode ser obtida pelo somatório das perdas de cargas parciais do sistema. As resistências de fluxo horizontal e vertical são dependentes das características do meio poroso no qual o dreno está inserido, enquanto a resistência radial é função das características do meio poroso e do diâmetro do tubo, e a resistência de entrada é

dependente do diâmetro e tipo de tubo, do solo, do material envoltório utilizado e das características das ranhuras do dreno (Alhaddad; Naji, 2019; Ernst, 1954; Gaj; Madramootoo, 2021; Ghane *et al.*, 2022; Harr, 1962).

A resistência de entrada pode ser definida como uma perda de carga adicional causada pela permeabilidade parcial de um tubo de drenagem. Em suma, isso acontece porque nos drenos fechados a água entra nos tubos através de pequenos orifícios ao longo de sua seção horizontal, como pode ser visualizado na Figura 1.10 (Dierickx; Van Der Molen, 1981; Gaj; Madramootoo, 2020; Ghane, 2022a, 2022c; Skaggs, 1978; Wesseling; Homma, 1967).

Figura 1.10 - Simulação das linhas de fluxo da água no solo (linhas brancas) adentrando as perfurações de um dreno tubular corrugado nas condições de ausência (a) e presença (b) de material envoltório ao redor dos tubos.



Fonte: do autor (2025), adaptado de Ghane (2022b).

Com a análise da Figura 1.10a é possível observar que no cenário de sistemas de drenagem sem envoltório, as linhas de fluxo da água no solo (linhas brancas) convergem à medida que se aproximam das perfurações do tubo. Esse fenômeno ocorre justamente devido ao número finito de orifícios do dreno que, de acordo com Dierickx (1999) e Oyarce *et al.* (2017), representam apenas cerca de 1 a 2% da área total de sua parede, sendo este um fator limitante que gera resistência de entrada e resulta na redução da velocidade do fluxo (Dierickx; van Der Molen, 1981; Gaj; Madramootoo, 2020; Ghane, 2022a, 2022c; Skaggs, 1978; Wesseling; Homma, 1967).

Já nos cenários onde há a presença de envoltório, a convergência das linhas de fluxo no solo em direção aos sistemas de drenagem tende a ser mínima ou até mesmo inexistente (Figura 1.10b). Isso ocorre pois, geralmente, o envoltório apresenta alta permeabilidade e, por isso, a

limitação do movimento e a velocidade do fluxo da água do solo para o interior do sistema de drenagem tende a ser mínima. Porém, ao atravessar o envoltório, as linhas de fluxo convergem para que a água passe pelas perfurações do dreno; no entanto, como esse processo ocorre sem a presença do solo, a velocidade do fluxo não diminui e a resistência de entrada gerada tende a ser reduzida (Alavi *et al.*, 2021; Byrne *et al.*, 2023a; Ghane, 2022b; Ghane *et al.*, 2022).

Além disso, é possível dizer que a quantidade, tipo e tamanho dos orifícios determinam a taxa de entrada de fluido no dreno, sendo que, geralmente, quanto maior a quantidade de perfurações, menor é a resistência de entrada total. No entanto, drenos com muitos orifícios tendem a ter uma resistência mecânica menor à compressão e tração, o que faz com que seja necessário que suas paredes sejam mais espessas para que consigam suportar a carga que o solo exerce sobre o sistema, o que automaticamente eleva o custo do produto. Ademais, o uso de material envoltório ou drenos com diâmetro maior tendem a serem mais eficientes na redução da resistência de entrada, o que acontece devido à menor perda de carga localizada na entrada, que ocorre devido à menor contração das linhas de fluxo (Gaj; Madramootoo, 2021; Wesseling; Homma, 1967).

Segundo Nijland, Croon e Ritzema (2005), as perfurações de um tubo de drenagem devem apresentar o maior tamanho possível para que a resistência de entrada seja reduzida e, ao mesmo tempo, devem ser mínimas para evitar que as partículas do solo ao redor do dreno entrem e obstruam o tubo. No entanto, Oyarce *et al.* (2017) discorrem que esses dois requisitos são, de certo modo, antagônicos, e por isso, estudos hidráulicos e mecânicos sobre drenos são relevantes para que possa ser determinado um orifício ideal, que equilibre estes requisitos e não encareça ou diminua a resistência do tubo. Segundo Lakruwan *et al.* (2021), o desempenho hidráulico de um dreno horizontal pode ser quantificado pela determinação da resistência de entrada, sendo o efeito do arranjo das perfurações sobre o desempenho do sistema de drenagem raramente discutido.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-DAYEM, Safwat. Drainage experiences in arid and semi-arid regions. **The World Bank**, Washington DC, 2000.
- ABDEL-DAYEM, Safwat; ABDEL-GAWAD, Shaden.; FAHMY, Hussam. Drainage in Egypt: a story of determination, continuity and success. **Irrigation and Drainage**, v. 56, p. 101–111, 2007.
- ABOELSOUND, Hesham M. *et al.* Quantitative Estimation of Saline-Soil Amelioration Using Remote-Sensing Indices in Arid Land for Better Management. **Land**, v. 11, n. 7, p. 1041, 2022.
- ADNAN, Rana Muhammad *et al.* Prediction of hydraulics performance in drain envelopes using Kmeans based multivariate adaptive regression spline. **Applied Soft Computing**, v. 100, p. 107008, 2021.
- AKRAM, Mojtaba *et al.* Subsurface drainage in Khuzestan, Iran: environmentally revisited criteria. **Irrigation and Drainage**, v. 62, p. 306–314, 2013.
- ALAVI, Seyed Abdollah *et al.* Performance evaluation of the Hydroluis drainpipe-envelope system in a saline-sodic soil. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106486, 2021.
- ALDAZ-LUSARRETA, Alaitz *et al.* Effects of innovative long-term soil and crop management on topsoil properties of a Mediterranean soil based on detailed water retention curves. **Soil**, v. 8, n. 2, p. 655–671, 2022.
- ALHADDAD, Amer Hassan; NAJI, Rusul Latteef. Comparison between Graded Crushed Gravel Filter and Textile Filter using Statistical Analysis. **Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences**, v. 22, n. 3, p. 166–171, 2019.
- ALLRED, Barry *et al.* Overall results and key findings on the use of UAV visible-color , multispectral, and thermal infrared imagery to map agricultural drainage pipes. **Agricultural Water Management**, v. 232, p. 106036, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106036>.
- ASKRI, Brahim; KHODMI, Sonia; BOUHLILA, Racchida. Impact of subsurface drainage system on waterlogged and saline soils in a Saharan palm grove. **Catena**, v. 212, p. 106070, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 21212**: Projeto de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSIS, Renato L. de *et al.* Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v. 29, n. 4, p. 558–568, 2009.
- BADIOU, Pascal; PAGE, Bryan; AKINREMI, Wole. Phosphorous retention in intact and drained prairie wetland basins: implications for nutrient export. **Journal of environmental quality**, v. 47, n. 4, p. 902–913, 2018.

BAHÇEÇI, Idris *et al.* A new drainpipe-envelope concept for subsurface drainage systems in irrigated agriculture. **Irrigation and Drainage**, v. 67, n. May, p. 40–50, 2018.

BASTAWESY, Mohammed El; ALI, Rafat Ramadan. The use of GIS and remote sensing for the assessment of waterlogging in the dryland irrigated catchments of Farafra Oasis, Egypt. **Hydrological Processes**, v. 27, p. 206–216, 2013.

BERTRAM, G. E. An experimental investigation of protective filters. **Soil Mechanics series n°7**, Publication n° 267, Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, 1940.

BEYENE, Adamu; MERKA, H.; TSIGE, D. Suitability analysis of vertically installed scoria gravel drains for enhancing consolidation performance of clayey ground. **Results in Engineering**, v. 17, p. 100975, 2023.

BOUARFA, S. *et al.* Drainage of irrigated land. In: PEREIRA, L. S. *et al.* **Sustainability of Irrigated Agriculture**. Brussels, Belgium: ASI Series. NATO, 1996. p. 323–341.

BRADY, Nyle C. **Natureza e propriedades do solo**. 6. ed. Rio de Janeiro: Freitas, 1983.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BUCKINGHAM, E. **Studies on the Movement of Soil Moisture; Bulletin 38**. Washington, DC, USA: Department of Agriculture Bureau of Soils, 1907.

BYRNE, Ian *et al.* Assessment of the hydraulic and filter performance of different drainage stone aggregates to elucidate an optimum size range for use in clay-textured soils. **Agricultural Water Management**, v. 278, n. 31, p. 108164, 2023a.

BYRNE, Ian *et al.* Investigating the suitability of synthetic envelopes as an alternative or complement to stone aggregate in clay-textured soils in Ireland. **Geoderma Regional**, v. 32, p. e00598, 2023b.

CANDIOTTO, Luciano Zanetti Pessoa; VARGAS, Fabio Alves de. Principais alterações no novo código florestal brasileiro e os potenciais impactos ao meio ambiente. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, 2018.

CARDOSO, Fabrício Bueno da Fonseca. **Poços para Captação das Águas Subterrâneas**. Brasília, DF: Agencia Nacional de Águas - ANA, 2016.

CASTELLANO, Michael J. *et al.* Sustainable intensification of agricultural drainage. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 10, p. 914–921, 2019.

CAVELAARS, J. C. **Hydrological aspects of the application of plastic drain pipes and filter materials**. Prague: Hydrological and technical problems of land drainage. Discussions. Czechoslovak Nat. Committee C.I.G.R., 1996.

CAVELAARS, J. C.; VLOTMAN, W. F.; SPOOR, G. Subsurface drainage systems. In: RITZEMA, H. P. (ed.) **Drainage Principles and Applications**. Wageningen: ILRI Publication, 1994. p. 827–930.

CENTENO, Luana Nunes *et al.* Dominant Control of Macroporosity on Saturated Soil Hydraulic Conductivity at Multiple Scales and Locations Revealed by Wavelet Analyses. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 1686–1702, 2020.

CHANDEL, Abhishish; SHANKAR, Vijay. Evaluation of empirical relationships to estimate the hydraulic conductivity of borehole soil samples. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2021.

CHAVARRÍA-VIDAL, Adrián Enrique; MIRANDA, Jarbas Honorio; FARIAS-RAMÍREZ, Asdrubal. Construcción de una mesa de succión de doble capa de bajo costo para definir macroporosidad (porosidad drenable) y microporosidad Construction of a low-cost suction table to define macroporosity (drainable porosity) and microporosity. **Tecnología en Marcha**, v. 33, n. 3, p. 90–97, 2020.

COSTA, Sandra Maria Fonseca da *et al.* Crescimento urbano e ocupação de várzea em pequenas cidades da Amazônia: uma discussão premente. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 20, n. 1, p. 114, 2016a.

COSTA, Larissa Fernandes *et al.* Espaço poroso em solos brasileiros usando microtomografia computadorizada de raios-X. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 03, p. 692–706, 2016.

COSTA FILHO, Waldir Duarte *et al.* **Noções básicas sobre poços tubulares - Cartilha informativa**. Recife, PE: CPRM Serviço Geológico do Brasil, 1998.

CUCCHIARO, Sara *et al.* Mapping vegetation-induced obstruction in agricultural ditches: A low-cost and flexible approach by UAV-SfM. **Agricultural Water Management**, [s. l.], v. 256, p. 107083, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107083>. Acesso em: 5 fev 2024.

DIERICKX, Willy. **Non-ideal drains: Agricultural drainage**. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1999.

DIERICKX, Willy; VAN DER MOLEN, W. H. Effect of perforation shape and pattern on the performance of drain pipes. **Agric. Water Manage**, v. 4, n. 4, p. 429–443, 1981.

DIERICKX, Willy; YUNCUOGLU, H. Factors affecting the performance of drainage envelope materials in structurally unstable soils. **Agricultural Water Management**, v. 5, p. 215–225, 1982.

DIMINESCU, Mihaela-amalia.; DUMITRAN, Gabriela Elena.; VUȚA, Liana Ioana. Experimental methods to determine the hydraulic conductivity. **E3S Web of Conferences**, v. 85, p. 06010, 2019.

DING, Kunlun; CHANG, Xiaomin. Drainage and ecological service of irrigation schemes in China. **Irrigation and Drainage**, v. 69, p. 97–107, 2020.

DOU, Xu *et al.* Simulation and evaluation of soil water and salt transport under controlled subsurface drainage using HYDRUS-2D model. **Agricultural Water Management**, v. 273, p. 107899, 2022.

EASTON, Zachary M; BOCK, Emily. Soil and Soil Water Relationships. **Virginia Technology - Virginia State University**, p. Publication BSE-194P, 2016.

EINAV, Itai; LIU, Mario. Hydrodynamics of Non-Equilibrium Soil Water Retention. **Water Resources Research**, v. 59, n. 1, p. e2022WR033409, 2022.

ELNASHAR, Walaa *et al.* Value Engineering Approach to Evaluate the Agricultural Drainage Water Management Strategies. **Water**, v. 15, n. 4, p. 831, 2022.

ERNST, L. **Het berekenen van stationaries groundwater storming walked in verticals flak afgebeeld kunnen worden [the computation of steady state groundwater flows, which can be projected in the vertical plane]**. Groningen, Netherlands: Insitute of T.N.O, 1954.

FILIPOVIĆ, Lana *et al.* Quantification of Intra- vs. Inter-Row Leaching of Major Plant Nutrients in Sloping Vineyard Soils. **Water**, v. 15, n. 4, p. 759, 2023.

FREELAND, Robert *et al.* Agricultural drainage tile surveying using an unmanned aircraft vehicle paired with Real-Time Kinematic positioning—A case study. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 165, p. 104946, 2019.

FUENTES, Carlos; CHÁVEZ, Carlos; BRAMBILA, Fernando. Relating Hydraulic Conductivity Curve to Soil-Water Retention Curve Using a Fractal Model. **Mathematics**, v. 8, n. 12, p. 2201, 2020.

GAILLOT, Arthur *et al.* Hydrosedimentary behavior of a field combining surface drains and tile drains. **Soil and Tillage Research**, v. 234, p. 105851, 2023.

GAJ, Naresh; MADRAMOOTOO, Chandra A. Effects of Perforation Geometry on Pipe Drainage in Agricultural Lands. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, n. 7, p. 04020015, 2020.

GAJ, Naresh; MADRAMOOTOO, Chandra A. Simulating upward soil-water flow from buried pipes with variable hydraulic characteristics. **Advances in Water Resources**, v. 158, p. 104074, 2021.

GALLICHAND, J.; MARCOTTE, D. Mapping clay content for subsurface drainage in the Nile Delta. **Geoderma**, v. 58, p. 165–179, 1993.

GARBOWSKI, Tomasz *et al.* An overview of natural soil amendments in agriculture. **Soil and Tillage Research**, v. 225, p. 105462, 2023.

GEBRETSADIK, Hailemariam Merka; MELESE, Damtew Tsige; NEGESA, Adamu Beyene. Consolidation Attributes and Deformation Response of Soft Clay Reinforced with Vertical Scoria Drains under Road Embankment. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2023.

GHANE, Ehsan. Choice of pipe material influences drain spacing and system cost in subsurface drainage design. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 38, n. 4, p. 685–695, 2022a.

GHANE, Ehsan. Choosing between sock-wrapped and sand-slot pipes. **Michigan State University**, [s. l.], 2022b.

GHANE, Ehsan. **Drain Sedimentation Tool**. 2022c. Disponível em: <https://dsiweb.cse.msu.edu/envelope/>. Acesso em: 9 out. 2022.

GHANE, Ehsan *et al.* Knitted-sock geotextile envelopes increase drain inflow in subsurface drainage. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107939, 2022.

GILJA, Gordon; HARASTI, Antonija; FLISZAR, Robert. DrainCAN—A MATLAB Function for Generation of a HEC-RAS-Compatible Drainage Canal Network Model. **Computation**, v. 9, n. 5, p. 51, 2021.

GONÇALVES, Denival de Lira; BRASIL, Davi do Socorro Barros. Problemas ambientais e sustentabilidade nas várzeas da Amazônia Tocantina: um estudo no Projeto de Assentamento Agroextrativista São João Batista II, Abaetetuba, Estado do Pará, Brasil. **Revista Pan-Amazônica de Saúde**, v. 7, n. 4, 2016.

GONÇALVES, Adriano Dicesar Martins de Araújo; LIBARDI, Paulo Leonel. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1174–1184, 2013.

GRAMLICH, Anja *et al.* Effects of artificial land drainage on hydrology, nutrient and pesticide fluxes from agricultural fields – A review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 266, n. March, p. 84–99, 2018.

GUERRA, Antonio Jose Teixeira. The effect of organic matter content on soil erosion in simulated rainfall experiments in W. Sussex, UK. **Soil Use and Management**, v. 10, n. 2, p. 60–64, 1994.

GUO, Chenyao *et al.* Influence of clogging substances on pore characteristics and permeability of geotextile envelopes of subsurface drainage pipes in arid areas. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, n. 5, p. 735–746, 2020.

GUO-QUAN, Ding *et al.* Bimodal SWCC and Bimodal PSD of Soils with Dual-Porosity Structure. **Mathematical Problems in Engineering**, 2022.

HARR, Milton Edward. **Groundwater and seepage**. United States of America: McGraw- Hill Book Company, 1962.

HILLEL, Daniel. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998a.

HILLEL, Daniel. **Physics: Environmental soil Fundamentals, applications, and environmental considerations**. San Diego, CA: Academic Press, 1998b.

HOLBAK, M. *et al.* A Physically Based Model for Preferential Water Flow and Solute Transport in Drained Agricultural Fields. **Water Resources Research**, v. 57, n. 3, p. e2020WR027954, 2021.

HOSSEINI, Pardis; BAILEY, Ryan T. Investigating the controlling factors on salinity in soil, groundwater, and river water in a semi-arid agricultural watershed using SWAT-Salt. **Science of The Total Environment**, v. 810, p. 152293, 2022.

INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE, ICID. **Multi-Lingual Technical Dictionary**. 1996. Disponível em: <https://www.icid.org/mtd.html>. Acesso em: 12 ago. 2022.

ISLAM, Mohammad Nazrul *et al.* Shallow surface and subsurface drains alleviate waterlogging and salinity in a clay-textured soil and improve the yield of sunflower in the Ganges Delta. **Agronomy for Sustainable Development** volume, v. 42, n. 16, 2022.

JABRO, Jalal David; STEVENS, William Bart. Pore Size Distribution Derived from Soil–Water Retention Characteristic Curve as Affected by Tillage Intensity. **Water**, v. 14, n. 21, p. 3517, 2022.

JAFARI, Fatemeh; SALMASI, Farzin; ABRAHAM, John. Numerical investigation of granular filter under the bed of a canal. **Applied Water Science**, v. 9, n. 137, 2019.

KABOOSI, Kami; LIAGHAT, Abdolmajid; HOSSEINI, Seyed Hadi. The feasibility of rice husk application as envelope material in subsurface drainage systems. **Irrigation And Drainage**, v. 61, n. 4, p. 490–496, 2012.

KAUR, Harpreet *et al.* Drainage water management impacts soil properties in floodplain soils in the midwestern, USA. **Agricultural Water Management**, v. 279, p. 108193, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108193>. Acesso em: 2 jul. 2024.

KAYAD, Ahmed *et al.* Latest Advances in Sensor Applications in Agriculture. **Agriculture**, v. 10, n. 362, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/8/362/htm>. Acesso em: 4 set. 2024.

KHALIL, Mahmoud M. *et al.* Poor drainage-induced waterlogging in Saharan groundwater-irrigated lands: Integration of geospatial, geophysical, and hydrogeological techniques. **Catena**, v. 207, p. 105615, 2021.

KHORRAMIAN, Navid *et al.* Qualitative evaluation of organic envelopes on subsurface. **Irrigation and Drainage**, v. 70, n. 4, 2020.

KRAMER, Geoff *et al.* Design and construction of an alternative drainage ditch system. **International Journal of Hydrology**, v. 3, n. 4, p. 259–268, 2019.

LAKRUWAN, Mihira *et al.* Experimental evaluation of effect of perforation arrangement on performance of horizontal drains in landslide mitigation. **Landslides**, v 18, p. 3707–3714, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01724-3>. Acesso em: 5 jan 2024.

LI, Ling *et al.* Role of Biochar in Improving Sandy Soil Water Retention and Resilience to Drought. **Water**, v. 13, n. 4, p. 407, 2021.

LIMA, Renato P. de *et al.* Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105215, 2022.

LUBIS, Kamaluddin. Evaluation of dimensions and drainage performance office in the Aceh Tamiang Area Kuala Simpang. **Britain International of Exact Sciences (BIOEx) Journal**, v. 3, n. 1, p. 20–32, 2021.

MALIK, Faryal; KHAN, Mudassar Nawaz; ISRAR-UD-DIN. Morphological and Biochemical Responses of Wheat to Flooding Stress and Recovery. **Sarhad Journal of Agriculture**, v. 38, n. 1, p. 379–387, 2022.

MALLANTS, Dirk *et al.* A Generic Method for Predicting Environmental Concentrations of Hydraulic Fracturing Chemicals in Soil and Shallow Groundwater. **Water**, v. 12, n. 4, p. 941, 2020.

MANTOVANI, Everardo Chartuni; BERNARDO, Salassier; PALARETTI, Luiz Fabiano. Sistemas de drenagem do solo. *In*: MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: Princípios e Métodos**. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2007. p. 311–318.

MARIÑO, Miguel A.; LUTHIN, James N. Chapter 6 Design of Subsurface Drains. *In*: MARIÑO, Miguel A.; LUTHIN, James N. **Developments in Water Science - Seepage and Groundwater**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982. p. 113–134.

MARTÍNEZ-ARIAS, Clara *et al.* Beneficial and pathogenic plant-microbe interactions during flooding stress. **Plant, Cell & Environment**, v. 45, n. 10, p. 2875–2897, 2022.

MATEO-MARÍN, Noemí *et al.* Impacts of tillage and nutrient management on soil porosity trends in dryland agriculture. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 1, p. e13139, 2021.

MAWLOOD, Dana Khider; ADNAN, Kurdistan Neyaz. Comparison of the water movement by Richard and Darcy. **Journal of Pure and Applied Sciences**, v. 32, n. 1, 2020.

MEHDINEJADIANI, Behrouz; FATHI, Parviz; KHODAVERDILOO, Habib. An inverse model-based Bees algorithm for estimating ratio of hydraulic conductivity to drainable porosity. **Journal of Hydrology**, v. 608, p. 127673, 2022.

MENG, Jian *et al.* Study on the clogging mechanism of upward inclined drainage holes in cut slopes. **Frontiers in Earth Science**, v. 11, p. 1103323, 2023.

MESQUITA, Maria da Glória Bastos de Freitas; MORAES, Sergio Oliveira. The dependence of the saturated hydraulic conductivity on physical soil properties. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963–969, 2004.

MINASNY, Budiman; MCBRATNEY, Alex B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 39–47, 2018.

MINNES, Sarah *et al.* Transforming conflict over natural resources: A socio-ecological systems analysis of agricultural drainage. **Facets**, v. 5, n. 1, p. 864–886, 2020.

MOURSI, Hossam; YOUSSEF, Mohamed A.; CHESCHEIR, George. M. Development and application of DRAINMOD model for simulating crop yield and water conservation benefits of drainage water recycling. **Agricultural Water Management**, v. 266, p. 107592, 2022.

MUKHOPADHYAY, Raj *et al.* Restoring soil quality and carbon sequestration potential of waterlogged saline land using subsurface drainage technology to achieve land degradation neutrality in India. **Science of The Total Environment**, v. 885, p. 163959, 2023.

MUZYKA, Roksana *et al.* Various biomass pyrolysis conditions influence the porosity and pore size distribution of biochar. **Energy**, v. Part E, p. 126128, 2023.

NIJLAND, H. J.; CROON, F. W.; RITZEMA, H. P. **Subsurface Drainage Practices: Guidelines for the implementation, operation and maintenance of subsurface pipe drainage systems**. Wageningen, Netherlands: ILRI Publication no 60, 2005.

NOVICK, Kimberly A. *et al.* Confronting the water potential information gap. **Nature Geoscience**, v. 15, p. 158–164, 2022.

NOZARI, Hamed; AZADI, Saeed. Experimental evaluation of artificial neural network for predicting drainage water and groundwater salinity at various drain depths and spacing. **Neural Computing and Applications**, v. 31, p. 1227–1236, 2017.

NRCS, Natural Resources Conservation Service. Chapter 14: Water management (Drainage). In: NRCS, **Part 650 Engineering Field Handbook - National Engineering Handbook**, 2001.

NTAJAL, Joshua *et al.* Water and Health Nexus — Land Use Dynamics, Flooding, and Water-Borne Diseases in the Odaw River Basin, Ghana. **Water**, v. 14, n. 3, p. 461, 2022.

OR, Dani; TULLER, Markus; WRAITH, Jon M. Water potential. In: GOSS, Michael; OLIVER, Margaret (eds.) **Encyclopedia of Soils in the Environment Second Edition**. UK: Elsevier, 2023. v. 5, p. 159–167.

OWUSU-ANSAH, Justice Kufour. The influences of land use and sanitation infrastructure on flooding in Kumasi, Ghana. **GeoJournal**, p. 555–570, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10708-015-9636-4>. Acesso em: 9 mar 2024.

OYARCE, Patricio *et al.* Experimental Evaluation of Agricultural Drains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 4, p. 04016082, 2017.

PITTELKOW, Cameron M. *et al.* When does no-till yield more? A global meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 183, p. 156–168, 2015.

QIAN, Yingzhi *et al.* Experiment and numerical simulation for designing layout parameters of subsurface drainage pipes in arid agricultural areas. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106455, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106455>. Acesso em: 6 fev 2024.

REHMAN, Zia ur *et al.* Machine learning-based intelligent modeling of hydraulic conductivity of sandy soils considering a wide range of grain sizes. **Engineering Geology**, v. 311, p. 106899, 2022.

REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2ªed. Barueri, SP: Manole, 2012.

RIBEIRO, Davidson Silva *et al.* Modeling and simulation of trifluralin herbicide movement due to its application on soils by chemigation. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 16, 2022.

RITZEMA, Henk P. *et al.* Challenges in modernizing the subsurface drainage systems in Egypt. **Agricultural Water Management**, v. 288, p. 108484, 2023.

RITZEMA, Henk P. **Drainage Principles and Applications**. 3. ed. Wageningen: ILRI Publication, 2006.

RITZEMA, Henk P.; NIJLAND, H. J.; CROON, F. W. Subsurface drainage practices: From manual installation to large-scale implementation. **ScienceDirect**, v. 86, p. 60–71, 2006.

ROLLIN, A. L.; BROUGHTON, R. S.; BOLDUC, G. F. Thin synthetic envelope materials for subsurface drainage tubes. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 5, p. 99–122, 1987.

RUDI, Gabrielle; BAILLY, J. S.; VINATIER, F. Using geomorphological variables to predict the spatial distribution of plant species in agricultural drainage networks. **Plos One**, v. 13, n. 1, p. e0191397, 2018.

SADEGHI, Hamed; DARZI, Ali Golaghaei. A Soil–Water Retention Model Incorporating Pore-Fluid Osmotic Potential. **International Journal of Geomechanics**, v. 23, n. 11, 2023.

SAEDI, Tayebah *et al.* Effect of *Epichloë* fungal endophyte symbiosis on tall fescue to cope with flooding - derived oxygen - limited conditions depends on the host genotype. **Plant soil**, v. 468, p. 353–373, 2021.

SANTOS, Rodrigo V. *et al.* Assessment of Biomass and Biochar of Maritime Pine as a Porous Medium for Water Retention in Soils. **Energies**, v. 15, n. 16, p. 5882, 2022.

SCHULTZ, Bart. **Guidelines on the construction of horizontal subsurface systems**. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), Working Group on Drainage Construction: New Delhi, India, 1990.

SCHULTZ, Bart. Irrigation, drainage and flood protection in a rapidly changing world. **Irrigation and Drainage**, v. 50, n. 4, p. 261–277, 2001.

SCHULTZ, Bart. **Land and water development: finding a balance between implementation, management and sustainability**. Delft, The Netherlands: International Institute for Infrastructural Engineering (IHE), 1993.

SCHULTZ, Bart; ZIMMER, Daniel; VLOTMAN, Willem F. Drainage under increasing and changing requirements. **Irrigation and Drainage**, v. 56, p. 3–22, 2007.

SILVA, Márcio de Carvalho; BARBOSA, Keith Valéria de oliveira. Entre miasmas e o anopheles: uma breve história da malária no alvorecer da República em Manaus (1898-1904). **Nova Revista Amazônica**, v. 9, n. 2, p. 37–49, 2021.

SILVA, Claudio Alberto S.; PARFITT, José Maria Barbat. **Drenagem superficial para diversificação do uso dos solos de várzea do Rio Grande do Sul**. Circular Técnica 40°. Pelotas, RS: EMBRAPA, 2004.

SILVEIRA, Renata Câmara Miranda. **Conservação, uso racional e sustentável da água: drenagem e controle da salinidade na irrigação (4h)**. Fortaleza, CE: Agência Nacional de Águas, 2016. Disponível em: https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2130/1/Drenagem_e_controle_de_salidade.pdf.

SILVEIRA, Renata Nayara Câmara Miranda. **Conservação, uso racional e sustentável da água: Drenagem e controle de salinidade na irrigação**. [S. l.]: Agência Nacional de Águas, 2020.

SINGH, Vijay Kumar *et al.* Novel Genetic Algorithm (GA) based hybrid machine learning-pedotransfer Function (ML-PTF) for prediction of spatial pattern of saturated hydraulic conductivity. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 16, n. 1, 2022.

SINGH, Ajay. Poor-drainage-induced salinization of agricultural lands: Management through structural measures. **Land Use Policy**, v. 82, p. 457–463, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.032>.

SINGH, Ajay. Salinization and drainage problems of agricultural land. **Irrigation and Drainage**, v. 69, n. 4, p. 844–853, 2020.

SION, Brad D.; SHOOP, Sally A.; MCDONALD, Eric V. Evaluation of in-situ relationships between variable soil moisture and soil strength using a plot-scale experimental design. **Journal of Terramechanics**, v. 103, p. 33–51, 2022.

SKAGGS, R. Wayne. Effect of drain tube openings on water-table drawdown. **J. Irrig. Drain. Div. ASCE**, v. 104, n. 1, p. 13–21, 1978.

SMAGIN, Andrey V. Thermodynamic Concept of Water Retention and Physical Quality of the Soil. **Agronomy**, v. 11, n. 9, p. 1686, 2021.

SMEDEMA, Lambert K.; VLOTMAN, Willem F.; RYCROFT, David W. **Modern land drainage: planning, design and management of agricultural drainage systems**. Rotterdam, the Netherlands: A.A. Balkema, 2004.

SMITH, Daniel J.; SNEAD, M.; THOMPSON, T. M. Soil Amended With Organic Matter Increases Fluvial Erosion Resistance of Cohesive Streambank Soil. **JGR Biogeosciences**, v. 127, n. 6, 2022.

STROCK, J. S. *et al.* Advances in drainage: selected works from the Tenth International Drainage Symposium. **Trans. ASABE**, v. 61, p. 161–168, 2018.

STUYT, Louis C. P. M.; DIERICKX, Willy. Design and performance of materials for subsurface drainage systems in agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 86, p. 50–59, 2006.

STUYT, Louis C. P. M.; DIERICKX, W.; BELTRÁN, J. M. **Materials for subsurface land drainage systems**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 60, rev. 1, 2005.

TELES, Geise Correa. Análise socioambiental de risco nas áreas de várzea da Amazônia: um olhar sobre as condições de injustiça ambiental urbana em Barcarena-PA. **Revista de Geografia - PPGeo - UFJF**, v. 10, n. 1, p. 17–39, 2020.

TELES, Alessandra Jacomelli *et al.* Socio - geographical factors and vulnerability to leptospirosis in South Brazil. **BMC Public Health**, v. 23, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12889-023-16094-9>.

TIWARI, Priyanka; GOEL, Arun. An overview of impact of subsurface drainage project studies on salinity management in developing countries. **Applied Water Science**, v. 7, n. 2, p. 569–580, 2017.

UFRRJ. **Macro drenagem**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/drena.htm>. Acesso em: 5 set. 2022.

URBAN, Daniel W. *et al.* The effects of extremely wet planting conditions on maize and soybean yields. **Climatic Change**, v. 130, p. 247–260, 2015.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Investigation of filter requirements for underdrains**. Technical Memorandum nº 183-1, 1941.

USHARANI, K. V.; ROOPASHREE, K. M.; DHANANJAY, N. Role of soil physical, chemical and biological properties for soil health improvement and sustainable agriculture. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 8, n. 5, p. 1256–1267, 2019.

VALIPOUR, Mohammad *et al.* The evolution of agricultural drainage from the earliest times to the present. **Sustainability**, v. 12, n. 416, 2020.

VERMA, Chhedi Lal *et al.* Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity of Reclaimed Sodic Soils by Inverse Auger Hole Methods with Different Bottom Geometries. **Journal of Natural Resource Conservation and Management**, v. 3, n. 1, p. 34–42, 2022.

VERTEMATTI, José Carlos; AGUIAR, Paulo Roberto. **Sistemas drenantes: aspectos teóricos e práticos**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp, 1977.

VICENTE, Laís De Carvalho. Drenagem agrícola. **Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Unidade de Aprendizagem**, 2021.

VLOTMAN, Willem F.; WILLARDSON, L. S.; DIERICKX, W. **Envelope design for subsurface drains**. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 2001. Disponível em: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/81694>.

VYMAZAL, Jan; BREZINOVÁ, Tereza Dvoraková. Removal of nutrients, organics and suspended solids in vegetated agricultural drainage ditch. **Ecological Engineering**, v. 118, p. 97–103, 2018.

WANG, Yanyan *et al.* Progress of Euhalophyte Adaptation to Arid Areas to Remediate Salinized Soil. **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 704, 2023.

WESSELING, J.; HOMMA, F. Entrance resistance of plastic drain tubes. **NJAS-Wageningen J. of Life Sciences**, v. 15, n. 3, p. 170–182, 1967.

WIT, Janine A. *et al.* Development of subsurface drainage systems: Discharge – retention – recharge. **Agricultural Water Management**, v. 269, p. 107677, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107677>. Acesso em: 15 ago 2022.

WU, Zhe *et al.* Experimentally Based Numerical Simulation of the Influence of the Agricultural Subsurface Drainage Pipe Geometric Structure on Drainage Flow. **Agriculture**, v. 12, n. 12, p. 2174, 2022.

XIAN, Changchi *et al.* Modeling hourly subsurface drainage using steady-state and transient methods. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 550, p. 516–526, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.016>. Acesso em: 15 out 2023.

YANG, Yuhui *et al.* Effects of Subsurface Drainage on Soil Salinity and Groundwater Table in Drip Irrigated Cotton Fields in Oasis Regions of Tarim Basin. **Agriculture**, v. 12, n. 12, p. 2167, 2022.

YANNOPOULOS, Stavros I. *et al.* Evolution of the materials and methods used for subsurface drainage of agricultural lands from antiquity to the present. **Water**, v. 12, p. 1767, 2020.

ZAJÍČEK, Antonín *et al.* How to Select a Location and a Design of Measures on Land Drainage – A Case Study from the Czech Republic. **Journal of Ecological Engineering**, v. 23, n. 4, p. 43–57, 2022.

ZHANG, Xi *et al.* Effect of Macroporosity on Pedotransfer Function Estimates at the Field Scale. **Vadose Zone Journal**, v. 18, n. 1, 2019.

ZHANG, Yonggen; SCHAAP, Marcel G. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1011–1030, 2019.

ZHAO, Xu-Dong; GONG, Wen-Hui. Model for large strain consolidation with non-Darcian flow described by a flow exponent and threshold gradient. **International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 43, n. 19, p. 2251–2269, 2019.

ZHENG, Zhong; STONE, Howard A. The Influence of Boundaries on Gravity Currents and Thin Films: Drainage, Confinement, Convergence, and Deformation Effects. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 54, p. 27–56, 2022.

ZHOU, Zikai; GUO, Qizhong. Drainage Alternatives for Rain Gardens on Subsoil of Low Permeability: Balance among Ponding Time, Soil Moisture, and Runoff Reduction. **Journal of Sustainable Water in the Built Environmen**, v. 8, n. 3, 2022.

2 PARTE 2 – ARTIGOS

2.1 ARTIGO 1 – CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE DRENOS TUBULARES COM ORIFÍCIOS QUE DISPENSAM O USO DE MATERIAL ENVOLTÓRIO EM DRENAGEM SUBTERRÂNEA

RESUMO

A utilização de drenos com orifícios estreitos e alongados pode eliminar a necessidade de envoltório, o que é economicamente vantajoso na drenagem subterrânea. Contudo, essa tecnologia ainda é pouco difundida e estudada. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar e comparar a capacidade de admissão de água de um tubo de drenagem com orifícios considerados não convencionais que tem aplicação preconizada sem uso de material envoltório (Dreno KC), com o desempenho de um dreno com orifícios tradicionais nas condições de presença (Dreno CM) e ausência de envoltório (Dreno SM). Para isso foi desenvolvido um aparato experimental que permitiu a variação da carga hidráulica aplicada sobre os sistemas drenantes. Foi realizada a caracterização geométrica dos orifícios de cada dreno e calculou-se a vazão escoada por orifício (Qd_o), resistência de entrada, raio efetivo e a adequabilidade da equação de orifícios (E_{qo}). Observou-se, para todos os sistemas drenantes, que quanto maior a carga hidráulica aplicada, maior a Qd_o . A vazão do Dreno SM foi estatisticamente superior à do Dreno KC, que foi superior à do Dreno CM. No entanto, a diferença absoluta de vazão entre os dois últimos drenos foi pequena (6,02%). Em termos de capacidade de drenagem, o desempenho do Dreno KC é superior, o que pode ser vantajoso, já que este dreno dispensa o emprego de envoltório. A E_{qo} mostrou-se adequada para representar o comportamento hidráulico dos Drenos SM e KC, contudo, para o Dreno CM, esta adequabilidade foi constatada apenas quando o coeficiente de descarga e o expoente de carga foram ajustados concomitantemente.

Palavras-chave: drenagem agrícola; capacidade de drenagem; hidráulica de orifícios; obstrução de drenos; *sand-slot pipes*.

2.1 ARTICLE 1 – HYDRAULIC CHARACTERIZATION OF DRAINPIPES WITH ORIFICES THAT DO NOT REQUIRE THE USE OF ENVELOPE MATERIAL IN SUBSURFACE DRAINAGE.

ABSTRACT

Using drainpipes with narrow and elongated orifices can eliminate the need for envelope material, which is economically advantageous in internal drainage of soil profile; however, this technology is poorly widespread and studied. In this context, the objective of the present study was to evaluate and compare the water intake capacity of a drainpipe with unconventional orifices, with a proposed application without using envelope material (Drainpipe KC), and compare it with the performance of a traditional orifices drainpipe with (Drainpipe CM) and without (Drainpipe SM) envelope. Thus, an experimental apparatus was developed to allow the hydraulic head variation when applied to the drainage systems. The geometric characterization of each drainpipes' orifices was performed, and the flowrate per orifice (Q_{do}), inlet resistance, effective radius, and the suitability of the orifice equation (E_{qo}) were determined. It was observed that the greater the applied hydraulic head, the greater the Q_{do} for all drainage systems. The flow rate of Drainpipe SM was statistically higher than that of Drainpipe KC, which was higher than that of Drainpipe CM, however, the absolute difference in flow rate between the last two drains was small (6.02%). The efficiency of Drainpipe KC is superior in terms of drainage capacity, which can be advantageous since this drainpipe dispenses the envelope material. The E_{qo} proved adequate to represent the hydraulic behavior of Drainpipes SM and KC, but for Drain CM, this suitability was found only when the discharge coefficient and head exponent were concurrently fitted.

Keywords: agricultural drainage; drainage capacity; orifice hydraulics; drain clogging; sand-slot pipes.

2.1.1 INTRODUÇÃO

Uma das maiores adversidades referentes à prática da drenagem subterrânea está relacionada à redução do desempenho do sistema devido à obstrução dos orifícios das tubulações (Ghane *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2023; Yannopoulos *et al.*, 2020). Esse fenômeno pode ocorrer devido a diversos fatores, como: baixa estabilidade estrutural do solo nas proximidades do sistema drenante e alta velocidade de entrada do fluxo de água do meio poroso para o dreno, condições que juntas, favorecem a erodibilidade do solo e podem resultar no carreamento de partículas sólidas para o interior do tubo de drenagem, onde podem se acumular. Ao longo do tempo, esse acúmulo de partículas sólidas pode resultar na obstrução gradual dos orifícios para a passagem de água dos drenos e no assoreamento das tubulações, reduzindo a capacidade de drenagem do sistema e, conseqüentemente, seu desempenho (Alavi *et al.*, 2021; Bahçeci *et al.*, 2018; Ghane, 2022b; Oyarce *et al.*, 2017).

Para solucionar este problema, é comum que seja empregado material envoltório entre o dreno tubular e o meio poroso. Este material, que pode ser sintético, mineral ou orgânico, deve apresentar uma condutividade hidráulica superior à da camada de solo adjacente ao dreno. Essa característica permite manter o gradiente hidráulico do solo nas proximidades do sistema drenante em níveis baixos, reduzindo a velocidade do fluxo de água no solo e minimizando o carreamento de partículas para o interior do dreno (Bahçeci *et al.*, 2018; Batista *et al.*, 2002; Ghane *et al.*, 2022; Vlotman; Smedema; Rycroft, 2020; Yannopoulos *et al.*, 2020).

Atualmente, os envoltórios mais utilizados são os sintéticos, sobretudo a manta geotêxtil, o que se deve, principalmente, à sua boa durabilidade e facilidade de transporte (Adnan *et al.*, 2021; Alavi *et al.*, 2021; Byrne *et al.*, 2023b; Ding; Chang, 2020). Contudo, estes materiais elevam o custo do sistema, dificultam a instalação dos drenos sob o solo e estão sujeitos à colmatação física. Esse fenômeno ocorre devido ao acúmulo de partículas sólidas nos poros do elemento envoltório, o que reduz a sua permeabilidade e, conseqüentemente, o desempenho do sistema de drenagem subterrâneo (Alavi *et al.*, 2021; Byrne *et al.*, 2023b; Ghane *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2020; Stuyt; Dierickx; Beltrán, 2005).

Como alternativa mais econômica ao uso de envoltórios, algumas indústrias especializadas em drenagem nos Estados Unidos e Canadá iniciaram a produção de tubos projetados para dispensar o uso de material envoltório. Esses tubos apresentam orifícios para a passagem de água muito estreitos, com largura próxima à 0,38 mm, o que reduz a velocidade de entrada do fluxo de água do solo para o dreno devido à resistência ao escoamento, minimizando os riscos de erosão e arraste de sólidos para dentro dos drenos. Embora possam apresentar

variações em suas características, esses drenos são comumente denominados *sand-slot*, *narrow-slot*, *knife-cut* ou *fine-slot*. Além disso, a largura diminuta dos orifícios limita a passagem de partículas sólidas com diâmetro superior, o que também minimiza os riscos de obstrução das tubulações e entrada de sólidos para o interior do tubo. Por conseguinte, estas características fazem com que o uso envoltório seja dispensado, o que reduz os custos do sistema de drenagem (Ghane, 2022a, 2022c; Ghane *et al.*, 2022).

Essa tecnologia, no entanto, ainda é pouco difundida, e presume-se que isso se deva, principalmente, aos receios relacionados à capacidade dos sistemas que utilizam estes tubos em relação aos sistemas que utilizam drenos com orifícios convencionais e material envoltório. Além disso, as tecnologias e metodologias de drenagem que foram desenvolvidas no passado, são notavelmente semelhantes aos padrões modernos (Yannopoulos *et al.*, 2020), fato que pode ser atribuído à escassez de estudos recentes relacionados a este tema, dificultando a evolução científica nesta área.

Atualmente, diversos trabalhos exploram cientificamente e tecnicamente a drenagem artificial como um instrumento da gestão hídrica (Wit *et al.*, 2022), buscando o aprimoramento da estimativa de parâmetros utilizados no dimensionamento de sistemas de drenagem (Chelil *et al.*, 2022); no desenvolvimento de novos modelos que estimem a taxa de drenagem para condições locais de solo e clima (Ghane; Askar; Skaggs, 2021) e que minimizem o arraste e lixiviação indesejada de nutrientes no solo (Henine *et al.*, 2022); no aprimoramento (Allred *et al.*, 2021) e desenvolvimento de metodologias capazes de detectar redes de drenagem instaladas sob o solo (Song; Woo; Yan, 2021); quanto ao emprego de redes neurais artificiais para obtenção de sistemas de drenagem mais eficientes e sustentáveis (Ellafi; Deeks; Simmons, 2021). No entanto, pouco é estudado sobre o desenvolvimento e a aplicabilidade de novas tecnologias relacionadas aos tubos de drenagem, como os *sand-slot pipes*, que já são utilizados em algumas localidades da América do Norte (Ghane, 2022a, 2022c; Ghane *et al.*, 2022).

Então, dada a complexidade e relevância da drenagem artificial na gestão dos recursos hídricos e na produtividade agrícola (Kaur *et al.*, 2023; Minnes *et al.*, 2020; Yannopoulos *et al.*, 2020), o objetivo deste trabalho foi avaliar as características hidráulicas de um dreno tubular corrugado, cuja utilização é preconizada sem envoltório, para que, caso seu desempenho seja satisfatório, a instalação de sistemas de drenagem subterrânea possa ser facilitada e os custos do sistema, reduzidos. Para isso, foram comparados, por meio de um modelo experimental, as capacidades de drenagem de dois drenos distintos: um com orifícios para passagem da água no formato *knife-cut*, que apresenta dimensões reduzidas e geometria mais alongada; e outro, com

orifícios considerados convencionais, que apresentam dimensões superiores e geometria mais arredondada.

2.1.2 MATERIAL E MÉTODOS

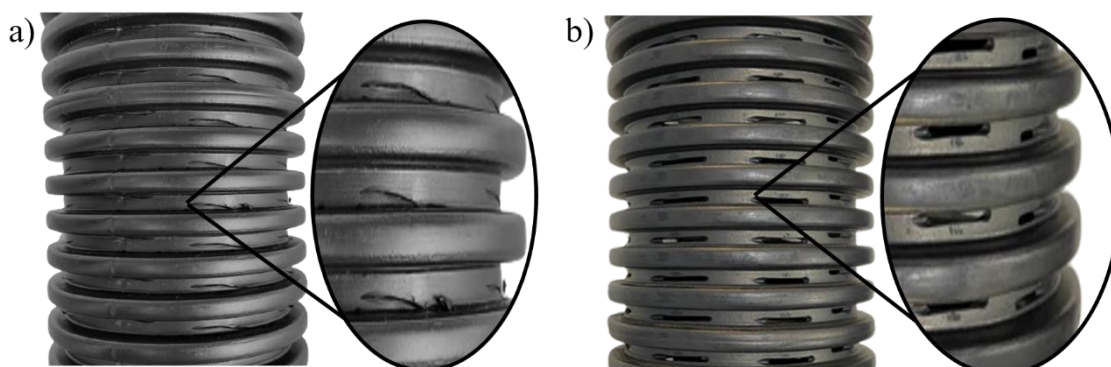
2.1.2.1 Local de realização dos procedimentos experimentais e especificação e preparação dos tubos de drenagem

A caracterização morfométrica dos orifícios para a passagem de água dos drenos estudados foi realizada no Departamento de Biologia, setor Botânica, da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais, Brasil, enquanto os demais procedimentos experimentais foram realizados no Departamento de Recursos Hídricos - UFLA.

Foram avaliados dois drenos tubulares, corrugados, flexíveis, fabricados em Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e diâmetro nominal igual a 100 mm. As grandezas físicas análogas entre estes drenos, que são relevantes à este trabalho, foram mensuradas com o auxílio de um paquímetro com precisão de 0,01 mm e estão apresentadas a seguir: raio externo (R_o) igual a 48,7 mm; raio interno (R_i) igual a 43,0 mm; largura da parte côncava das corrugações, denomina por anéis do dreno (β_v), igual a 0,72 mm; número de orifícios longitudinais por anel do dreno (N) igual a 8; e distância entre os orifícios de um anel até os orifícios localizados no próximo anel com perfurações (X) igual a 12,00 mm.

Contudo, os orifícios para a passagem de água do primeiro tubo, designado como “Dreno KC”, que tem aplicação preconizada sem o uso de material envoltório, apresentam dimensões menores, mais alongadas e no formato *knife-cut*, que recebe esse nome devido à sua semelhança com um corte feito à faca (Figura 2.1a). Em contrapartida, as perfurações do segundo tubo, consideradas convencionais, são maiores e mais arredondadas (Figura 2.1b). Estes orifícios localizam-se na parte côncava ou depressão das corrugações, que foram denominadas como anéis do dreno. A escolha do material, bem como o diâmetro dos tubos a serem estudados, foi determinada no que é habitualmente utilizado em sistemas de drenagem atuais, ou seja, 100 mm (Gaj; Madramootoo, 2021; Wu *et al.*, 2022).

Figura 2.1 - Drenos utilizados no experimento a) dreno com orifícios menores, no formato *knife-cut*, designado “Dreno KC”; b) dreno com orifícios maiores, no formato arredondado, designado “Dreno SM”.



Fonte: do autor (2025).

O desempenho do dreno com orifícios convencionais foi avaliado em duas condições: na ausência de material envoltório, denominado "Dreno SM", e na presença de material envoltório, denominado "Dreno CM". O material utilizado como envoltório foi uma camisa drenante de 100 mm de diâmetro, confeccionada em poliéster não tecido e permeável. Esse procedimento não foi aplicado ao "Dreno KC", pois seus orifícios foram projetados especificamente para dispensar o uso de envoltório em sistemas de drenagem subterrânea.

Visando reduzir a vazão de água necessária nos ensaios, apenas os orifícios de três anéis subsequentes, ou seja, 24 perfurações, descarregaram água, sendo todos os demais orifícios do dreno obstruídos. Para isso, estes anéis foram vedados com cola de silicone e, após o período de secagem de 24 horas, as vedações foram verificadas e reforçadas. Por fim, para garantir as vedações, o dreno foi circundado por 20 camadas de plástico filme PVC, que foram fixadas com o auxílio de fita adesiva para tubos.

2.1.2.2 Caracterização geométrica dos orifícios dos tubos de drenagem

A determinação do comprimento, largura, área de abertura para a passagem de água, perímetro, circularidade, alongamento e compacidade dos orifícios foi realizada por meio do processamento de imagens digitais, que foram produzidas em maior escala, em um estereomicroscópio da marca Nikon, modelo SMZ745T, com câmera Infinity 1 acoplada e taxa de zoom de 5x.

Para isso, foram fotografados todos os orifícios de três anéis selecionados aleatoriamente de cada dreno. Para que o corpo de prova coubesse na mesa do estereomicroscópio, foi preciso extrair cada orifício com o auxílio de uma tesoura, o que

resultou em 24 amostras de cada tubo drenante. Os corpos de prova foram fotografados sobre um papel milimetrado que serviu como escala padrão para as leituras.

O processamento e análise das imagens foi realizado no software ImageJ (Schneider; Rasband; Eliceiri, 2012). Neste software, o cálculo das dimensões dos corpos de prova é realizado por meio da contagem de pixels das regiões selecionadas (Rasband, 2011). Portanto, após a calibração da escala padrão, as imagens foram convertidas em 8 bits e os limites dos corpos de prova foram estabelecidos pelo usuário para que os valores das variáveis morfométricas analisadas pudessem ser determinados. Por fim, foram calculadas a média e o coeficiente de variação (Equação 2.1) dos valores obtidos para cada tipo de tubo de drenagem.

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} 100 \quad (2.1)$$

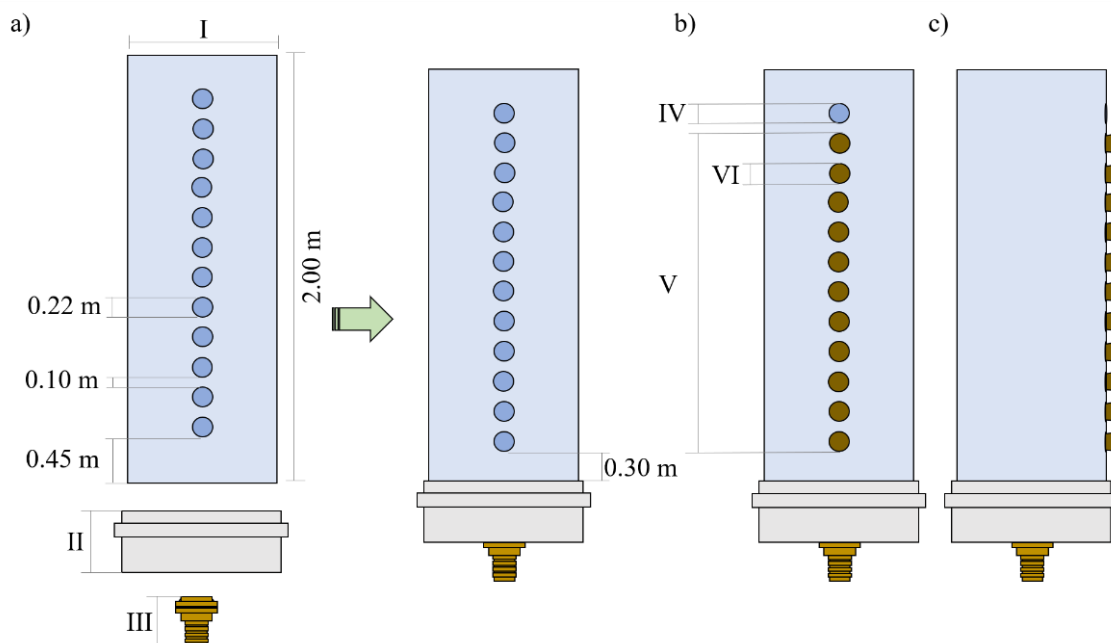
Em que CV é coeficiente de variação, em %; S é o desvio padrão das amostras, em mm; e $\bar{X}$ é a média das amostras, em mm.

A circularidade, também conhecida por arredondamento ou angularidade, correlaciona a área pelo perímetro e descreve a forma do objeto quanto a sua circularidade. Os valores passíveis de serem obtidos para essa variável variam de 0 a 1, sendo 1 quando a amostra for um círculo perfeito; e 0 quando a amostra for um polígono infinito e alongado. Já a compacidade viabiliza a medida da circularidade, sendo que quanto mais afastado de 1 for seu valor, menos circular é objeto. Já o alongamento é a razão entre o eixo menor pelo eixo maior da amostra, e se seu valor for igual a 1, infere-se que o objeto é aproximadamente circular ou quadrado. Na medida que se afasta de 1, mais alongado torna-se o objeto (Ferreira; Rasband, 2012; Viana; Clemente; Oliveira, 2016).

2.1.2.3 Desenvolvimento e operação do aparato experimental

A caracterização hidráulica dos tubos de drenagem foi realizada por meio da quantificação da vazão de água escoada, em função da variação da carga hidráulica do sistema e da área de abertura dos orifícios de cada modelo de tubo de drenagem. Para isso, foi desenvolvido um aparato hidráulico experimental constituído por tubo PVC que envolvia o dreno a ser avaliado, permitindo a variação da carga hidráulica do sistema (Figura 2.2), e que possuía um ponto de descarga para condução e coleta da água escoada, estando essa estrutura conectada a um sistema de abastecimento de água.

Figura 2.2 - Esquematisação da estrutura que envolve o dreno avaliado e permite a variação da carga hidráulica sobre o dreno: partes constituintes (a); e estrutura com o 12º orifício aberto e demais vedados, em visão frontal (b) e lateral (c).



Legenda: I: Tubo em PVC DN 150 mm; II: Cap em PVC para esgoto DN 150 mm; III: Adaptador soldável para reservatório em PVC DN 32 mm; IV: Orifício aberto, correspondendo a carga hidráulica máxima do aparato experimental; V: Zona de orifícios vedados; VI: Rolha de cortiça utilizada para vedar os orifícios e permitir a variação da carga hidráulica do sistema.

Fonte: do autor (2025).

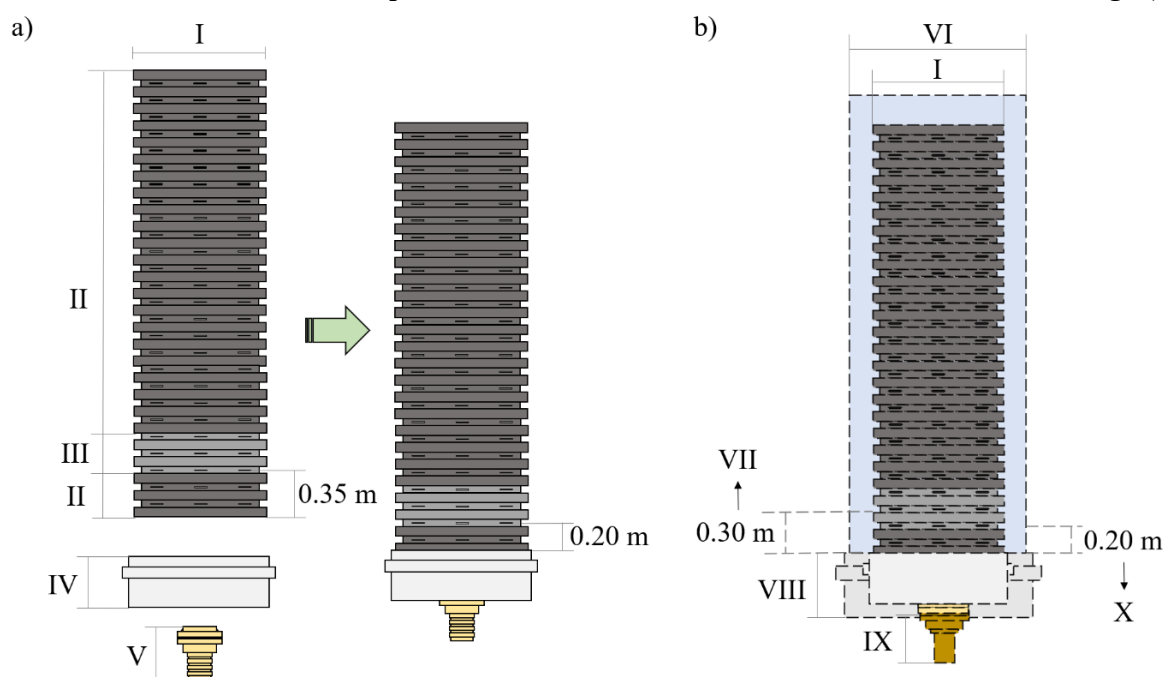
O tubo PVC apresentava diâmetro nominal de 150 mm, 2,0 m de comprimento e 12 orifícios equidistantes ao longo de sua extensão. Esses orifícios tinham a função de extravasores, ou seja, por meio de sua abertura ou vedação individual com rolhas de cortiça de mesmo diâmetro, permitiram variar ou manter constante a carga hidráulica sobre o sistema. Os orifícios foram perfurados com o auxílio de uma serra tipo copo de 22 mm, acoplada a uma furadeira. A primeira perfuração foi realizada à 0,45 m da base inferior do tubo e, a partir daí, as demais perfurações distavam 0,10 m uma das outras. Na parte inferior do tubo PVC, foi fixado um cap em PVC para esgoto DN 150, o qual, com o auxílio de uma serra tipo copo de 32 mm, teve seu centro perfurado e conectado a um adaptador soldável para reservatório em PVC DN 32. A esquematização dessa estrutura pode ser visualizada na Figura 2.2.

O adaptador autoajustável acoplado ao cap DN 150 foi então conectado a um conjunto de tubos e conexões de PVC DN 32 soldáveis destinadas a conduzir a água drenada até um ponto de coleta. Este sistema, designado como sistema de descarga, era constituído, nesta ordem, por: um tubo disposto verticalmente com 0,1 m de comprimento, um adaptador autoajustável para reservatório, um tubo disposto verticalmente com 0,15 m de comprimento,

um joelho de 90°, um tubo disposto horizontalmente com 0,20 m de comprimento, um registro de esfera, um tubo disposto horizontalmente com 0,10 m de comprimento, um joelho de 90° e um tubo disposto verticalmente com 0,10 m de comprimento.

O tubo de drenagem estudado foi encamisado pelo tubo PVC DN 150 mm e conectado ao sistema de descarga. Para isso, foi acoplado à base inferior do dreno um cap DN 100 para esgoto, que teve seu centro perfurado com o auxílio de uma serra copo de 32 mm. Nesse furo, foi instalado um adaptador autoajustável para reservatório de mesmo diâmetro, o qual foi acoplado, por meio de rosqueamento, ao adaptador que conecta o tubo PVC 150 e o sistema de descarga, fazendo a conexão entre as partes. A zona de orifícios desobstruídos do dreno distava, de forma subsequente, 0,35 m da sua base, para que descontando as perdas provenientes da conexão entre o dreno e o cap DN 100 (0,15 m), o primeiro orifício do tubo PVC DN 150 fornecesse uma carga hidráulica de 10 cm sobre o primeiro anel desobstruído do dreno. A esquematização dessa estrutura bem como o encamisamento do dreno pode ser visualizada na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Esquematização do processo de envolvimento do dreno: preparação do dreno (a) dreno encamisado pelo tubo PVC DN 150 e conectado ao sistema de descarga (b).



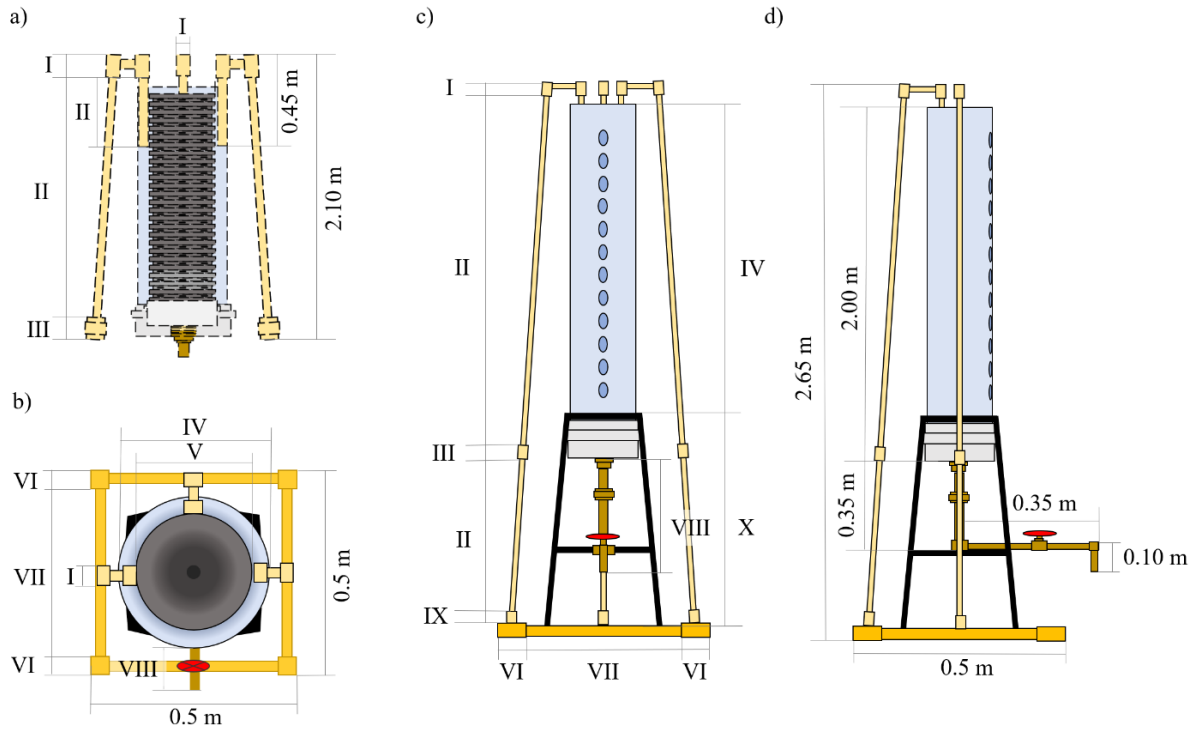
Legenda: I: Dreno corrugado em PEAD DN 100 mm; II: Zona com orifícios obstruídos; III: Zona com orifícios desobstruídos; IV: Cap em PVC para esgoto DN 100 mm; V: Adaptador soldável para reservatório em PVC DN 32 mm conectado ao cap DN 100 mm; VI: Tubo em PVC DN 150 mm; VII: localização do primeiro orifício do tubo em PVC DN 150 mm; VIII: Cap em PVC para esgoto DN 150 mm; IX: Adaptador soldável para reservatório em PVC DN 32 mm conectado ao cap DN 150 mm; X: Primeira zona de orifícios desobstruído do dreno DN 100 mm.

Fonte: do autor (2025).

No espaço vazio existente entre o dreno e o tubo PVC, foram posicionadas três tubulações de PVC DN 32 com 0,45 m de comprimento. Essas tubulações foram conectadas, cada uma, a um sistema hidráulico constituído por tubos e conexões soldáveis em PVC e DN 32, que faziam a conexão do aparato experimental com um sistema de abastecimento contínuo de água. O sistema hidráulico era constituído, nesta ordem, por um joelho de 90°, um tubo disposto horizontalmente com 0,10 m de comprimento, um joelho de 90°, um tubo disposto verticalmente com 2,10 m de comprimento, um adaptador flange de reservatório, um tubo disposto verticalmente com 50 cm de comprimento e um tê de redução 50 mm x 32 mm, que estava acoplado a um conjunto de tubos de 5 metros de comprimento e joelhos de 90°, todos em PVC e DN 50 mm, que circundavam a base da estrutura utilizada para sustentar o aparato e conectavam o sistema a uma adutora de PVC DN 50 mm de engate rápido. A disposição dessas tubulações assegurou que a água chegasse de forma uniforme a todos os orifícios do dreno, garantindo que cada um recebesse a mesma quantidade de água, sem grandes variações.

O aparato foi sustentado, verticalmente, por uma estrutura prismática quadrangular de madeira. O ensaio foi iniciado com a carga hidráulica máxima e, para isso, todas as perfurações do tubo PVC do foram vedadas com as rolhas de cortiça, exceto a décima segunda, a contar do nível do solo, que, neste momento, atuava como um ladrão hidráulico. Em seguida, o registro do sistema de abastecimento de água foi aberto e espaço vazio entre o tubo PVC e o dreno começou a ser preenchido com água, até que o nível do extravasor fosse atingido. A partir desse momento, a carga hidráulica do sistema passou a ser constante. A esquematização do corte lateral do tubo de drenagem encamisado pelo tubo PVC DN 150 e das tubulações de abastecimento pode ser visualizada na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Aparato experimental: corte (a), vista superior (b), frontal (c) e lateral (d) do sistema.



Legenda: I: Joelho de 90° em PVC DN 32 mm; II: Tubo em PVC DN 32 mm; III: um adaptador flange de reservatório em PVC DN de 32 mm; IV: Tubo em PVC DN 150 mm; V: Dreno corrugado em PEAD DN 100 mm; VI: Joelho de 90° em PVC DN de 50 mm; VII: Tubo em PVC DN 50 mm; VIII: Sistema de descarga; IX: tê de redução 50 mm x 32 mm; X: estrutura de madeira utilizada para sustentar verticalmente o aparato experimental.

Fonte: do autor (2025).

2.1.2.4 Fator de resistência de entrada e raio efetivo

O fator de resistência de entrada da água pelos orifícios do dreno foi obtido por meio da equação empírica proposta por Dierickx (1980):

$$\alpha_e = \frac{c}{2\pi^2 R_o} \left[\ln \left(\frac{2c}{\pi \beta_v} \right) - \frac{c}{4\pi R_o} \right] + \frac{c}{2\pi N \gamma_p} \ln \left[\frac{2 \sinh \frac{2\pi(R_o - R_i)}{\beta_v}}{\sin^2 \frac{\pi \beta_s}{2\beta_v}} \right] - \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{R_o}{R_i} \right) \quad (2.2)$$

Em que α_e é o fator de resistência de entrada da água pelos orifícios do dreno, valor adimensional; c é distância entre os orifícios de um anel até os orifícios localizados no próximo anel com perfurações, em m; R_o é o raio externo do dreno, em m; R_i é o raio interno do dreno, em m; β_v é a largura do anel do dreno, em m; β_s é a largura do orifício do dreno, em m; γ_p é o comprimento do orifício do dreno, em m; e N o número de orifícios longitudinais por anel.

Já o raio efetivo dos drenos foi calculado por meio da Equação 2.3 (Dierickx, 1999):

$$R_{ef} = R_o \exp(-2 \pi \alpha_e) \quad (2.3)$$

Em que R_{ef} é o raio efetivo do dreno, em m; R_o é o raio externo do dreno, em m; e α_e é o fator de resistência de entrada da água pelos orifícios do dreno, valor adimensional.

2.1.2.5 Vazão média por orifício e coeficiente de descarga

A vazão escoada em função da variação da carga hidráulica do sistema foi quantificada pelo método volumétrico direto (Tucci; Silveira, 2009). As cargas hidráulicas utilizadas foram 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00; 1,10 e 1,20 m, de forma a simular a profundidade máxima usual em que os drenos são instalados no campo, com três repetições.

Ao iniciar o ensaio, após verificado a condição de carga hidráulica máxima e constante no sistema, um béquero de grande volume foi posicionado sob o ponto de descarga do aparato experimental para que a água escoada fosse coletada. Este volume foi coletado em um intervalo de tempo de 10 segundos e a massa de água obtida foi medida com o auxílio de uma balança eletrônica com exatidão de 0,0001g e sua temperatura aferida com o auxílio de um termômetro. O valor da massa obtida foi, então, convertido em volume e vazão escoada real pode ser calculada por meio da Equação 2.4. Esse valor correspondeu a vazão escoada referente a carga hidráulica de 1,2 m. Em seguida, para calcular a vazão escoada correspondente à carga hidráulica seguinte (1,1 m), a rolha de cortiça do décimo primeiro orifício do tubo de PVC foi removida, transformando-o no novo extravasor hidráulico. Após essa modificação, todo o procedimento referente ao método volumétrico direto foi repetido, e a nova vazão escoada foi obtida. Esse ciclo foi repetido sucessivamente para as demais cargas hidráulicas, até que se atingisse o valor mínimo de 0,10 m.

$$Qd_r = \frac{P_{(H_2O)}}{\rho_{(H_2O)} t} \quad (2.4)$$

Em que Qd_r é a vazão escoada real, em $m^3.s^{-1}$; $P_{(H_2O)}$ é a massa da solução escoada, em kg; $\rho_{(H_2O)}$ é a massa específica da água em função de sua temperatura, em $kg.m^{-3}$; e t é o tempo de coleta da solução escoada, em s.

A vazão média escoada por orifício (Q_{d_o}) foi obtida pelo quociente entre a vazão escoada e o número de orifícios desobstruídos, ou seja, 24.

2.1.2.6 Coeficiente de descarga geral, específico e parcial

O coeficiente de descarga dos orifícios foi determinado por meio do ajuste de curvas, a partir da relação entre a vazão real e a vazão máxima escoada através de um orifício. Para isso, foi realizado uma análise de regressão para cada sistema drenante estudado, utilizando a Equação 2.5, considerando a vazão como variável dependente, a carga hidráulica como variável independente e a área da seção transversal como a área média da seção transversal dos orifícios do tubo de drenagem.

$$C_d = \frac{Q_{d_o}}{S \sqrt{2 g h}} \quad (2.5)$$

Em que C_d é o coeficiente de descarga do orifício, valor adimensional; Q_{d_o} é a vazão média escoada por orifício, em $m^3.s^{-1}$; S é a área de abertura do orifício, em m^2 ; g é a aceleração da gravidade, $9,81 m.s^{-2}$; h é a carga hidráulica à montante do orifício, em m ; e $S \sqrt{2 g h}$ é a vazão escoada máxima, em $m^3.s^{-1}$.

Este ajuste foi realizado para cada um dos tratamentos. Então, de posse a destes coeficientes, os dados de vazão foram estimados e comparados aos dados de vazão observados, e assim foi possível avaliar a adequabilidade do modelo utilizado, ou seja, avaliar se o comportamento hidráulico dos drenos em questão realmente se assemelhou ao de um orifício hidráulico. Para os drenos em que o R^2 calculado foi inferior à 70%, realizou-se o ajuste do coeficiente de descarga e do expoente de carga concomitantemente, ambos apresentados na Equação 2.5, sendo comparados, posteriormente, os dois valores de R^2 .

Além disso, com o intuito de comparar a magnitude dos coeficientes de descarga de cada sistema drenante, foi calculado o coeficiente de descarga específico, entendido como a razão entre o coeficiente de descarga obtido pelo ajuste único da equação de orifícios e a área de abertura de cada dreno. Além disso, a variabilidade do coeficiente de descarga em função da carga hidráulica foi analisada, sendo este parâmetro denominado "coeficiente de descarga parcial". Seus valores foram então comparados com o "coeficiente de descarga geral", especificado anteriormente. Para esse cálculo, foi utilizada a Equação 2.5 e os dados de vazão

observados de cada tratamento, com o auxílio de uma planilha eletrônica. Por fim, realizou-se a análise de regressão dessas variáveis.

2.1.2.7 Delineamento experimental e análise estatística

Foi aplicado um esquema fatorial, o qual foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) e possuía duas fontes de variação: sistema drenante (3 níveis: dreno “KC”, Dreno “SM” e Dreno “CM”) e carga hidráulica (12 níveis: 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70; 0,80; 0,90; 1,00; 1,10 e 1,20 m), o que somado às 3 repetições, resultou em 108 observações.

A análise individual das variáveis estudadas foi realizada por meio do teste F, à 5% de significância. O efeito da fonte de variação qualitativa foi comparado pelo teste de Scott-Knott, com níveis de significância de 5%, enquanto o efeito da fonte de variação quantitativa foi avaliado por meio de análise de regressão. Para isso foi utilizado o software SISVAR (Ferreira, 2019).

2.1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis para a caracterização geométrica dos orifícios para passagem de água dos tubos de drenagem estudados podem ser visualizadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Caracterização geométrica dos orifícios para a passagem de água do tubo de drenagem com orifícios em formato *knife-cut* (Dreno KC) e convencional sem envoltório (Dreno SM).

Dreno	A (mm ²)	P (mm)	L (mm)	Cp (mm)	C (-)	Al (-)	Cn (-)
KC	2,63	26,06	0,19	13,90	0,06	45,13	0,02
SM	17,83	27,55	1,64	13,47	0,33	7,30	0,14
CV KC (%)	34,50	19,48	63,54	18,78	28,02	25,57	27,91
CV SM (%)	21,11	15,65	18,64	18,72	21,34	22,90	23,38

Legenda: Valores médios obtidos por meio do software ImageJ para a área de abertura (A), perímetro (P), largura (L), comprimento (Cp), circularidade (C), alongamento (Al) e compacidade (Cn) dos orifícios para a passagem de água dos drenos com orifícios em formato *knife-cut* (Dreno KC) e convencional sem envoltório (Dreno SM), bem como o coeficiente de variação (CV) de cada um deles.

Fonte: do autor (2025).

Observa-se, pela análise da Tabela 2.1, que a magnitude de praticamente todas as variáveis analisadas referentes às grandezas geométricas dos orifícios do dreno convencional foi superior à do Dreno KC, exceto o alongamento e comprimento, que foram inferiores. Os valores apresentados para circularidade, alongamento e compacidade indicam que os orifícios dos drenos KC apresentam conformidade mais alongada, enquanto os drenos SM, mais arredondada (Ferreira; Rasband, 2012; Viana; Clemente; Oliveira, 2016), o que também pode ser constatado pela análise visual da Figura 2.1. Além disso, observou-se que os coeficientes de variação obtidos para o Dreno KC são superiores aos do dreno convencional e, portanto, foi verificado que os orifícios do dreno convencional apresentam maior uniformidade de suas características geométricas.

O fator de resistência de entrada obtido para os Drenos KC e convencional foram, nesta ordem, iguais à 0,39 e 0,32; enquanto o raio efetivo foi igual à 0,42 e 0,65 cm, respectivamente. Dessa forma, observa-se que drenos com orifícios maiores resultam em menor resistência de entrada e maior raio efetivo em comparação aos drenos com orifícios menores (Tabela 2.1). Esses resultados corroboram com os apresentados por Ghane (2022b) em seu estudo sobre os efeitos do uso de drenos corrugados com diferentes padrões de orifícios na drenagem agrícola subterrânea, onde as maiores resistências de entrada e menores raios efetivos foram observados

para orifícios com menores áreas de abertura. Além disso, o autor percebeu que, embora o aumento da largura ou comprimento dos orifícios resulte no incremento da área de abertura para a passagem de água do dreno, um incremento considerável do raio efetivo acontece apenas quando o incremento do comprimento dos orifícios é relevante.

Isso ocorre porque ao aumentar o comprimento dos orifícios, a proporção longitudinal do espaço ocupado pelas perfurações na parte côncava das corrugações do dreno também aumenta, o que reduz a convergência das linhas de fluxo em direção as perfurações, já que a distância a ser percorrida pela água até os orifícios é menor. Ademais, o autor adverte que o aumento da largura dos orifícios de drenos subterrâneos pode não ser interessante, pois o risco do carreamento de partículas sólidas e posterior obstrução do sistema é maior (Ghane, 2022a). De maneira semelhante, Gaj e Madramootoo (2020) discorrem que a resistência de entrada que acomete drenos corrugados com orifícios mais arredondados tende a ser superior à de drenos corrugados com orifícios com mesma área de abertura, mas geometria mais alongada. Os autores explicam que em drenos com orifícios mais alongados, as linhas de fluxo da água tendem a seguir um padrão de convergência planar de caminho radial (2D no plano XZ), enquanto em drenos com orifícios mais arredondados, a convergência das linhas de fluxo acontece nas dimensões XYZ, o que causa uma perda de carga hidráulica maior em relação à ocasionada pelos primeiros orifícios. No entanto, para as mesmas condições, a taxa de entrada de água nos drenos com orifícios mais arredondados é, via de regra, superior. Por fim, os autores concluem, que, para uma mesma área de abertura, o uso de drenos corrugados com orifícios mais alongados é hidraulicamente mais vantajoso.

A resistência de entrada pode ser definida como uma perda de carga adicional causada pela permeabilidade parcial de um tubo de drenagem. Em suma, esse fenômeno acontece porque as linhas de fluxo da água no solo tendem a convergir à medida que se aproximam dos orifícios dos drenos que, por serem finitos, geram perda de carga e resultam na redução da velocidade do fluxo drenagem. Este parâmetro é dependente do diâmetro e tipo de tubo, do solo, do material envoltório utilizado e das características das ranhuras do dreno (Dierickx, 1999; Dierickx; van Der Molen, 1981; Ghane, 2022).

Já o raio efetivo é entendido como o raio de um tubo fictício cujas paredes são completamente abertas (Skaggs, 1978), e está relacionado com a perda de carga de entrada causada pela convergência das linhas de fluxo em direção aos orifícios (Dierickx; van Der Molen, 1981). Este parâmetro é dependente dos atributos morfométricos e distribuição dos orifícios na parede do dreno, e caso utilizado, das características do material envoltório

empregado (Dierickx, 1999; Gaj; Madramootoo, 2021; Ghane, 2022a). Oyarce *et al.* (2017) apontam que quanto menor a resistência de entrada, maior é o raio efetivo do dreno.

O resumo da análise de variância (ANOVA) realizada para a avaliação da vazão por orifício dos drenos estudados em função dos tratamentos está apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Resumo da ANOVA realizada na avaliação da vazão escoada por orifício dos drenos estudados em função dos tratamentos aplicados.

Fonte de variação	GL	Vazão por orifício QM
SD	2	0,013979**
CH	11	0,000146**
SD x CH	22	0,000061**
Erro	72	$1,122305 \times 10^{-7}$
Total corrigido	107	-
CV (%)	-	2,45

Legenda: **: significativo ao teste F a 1% de significância. SD: sistema drenante. CH: carga hidráulica. GL: grau de liberdade. QM: quadrados médios. CV: coeficiente de variação.

Fonte: do autor (2025).

As vazões escoadas por orifício, por sistema drenante avaliado, podem ser vistas na Tabela 2.3. Com base nesta Tabela e nos parâmetros relacionados às grandezas físicas análogas entre os drenos, que foram apresentados na metodologia, têm-se que existem 167 anéis por metro de tubo, totalizando 13.336 orifícios. Com esses dados, calculou-se a vazão escoada por unidade de comprimento do tubo para cada sistema drenante. Os valores obtidos para o Dreno KC, Dreno SM e CM foram, nesta ordem, iguais à 13,55; 171,32 e 12,74 m³.h⁻¹. Observou-se, portanto, que a vazão média escoada por unidade de comprimento obtida para o Dreno SM foi aproximadamente 13 vezes superior à do Dreno KC, o que pode ser explicado pelos maiores valores das dimensões geométricas dos orifícios do primeiro tubo drenante em relação ao segundo, que, por conseguinte, possibilitaram uma taxa de entrada de água maior no sistema.

Tabela 2.3 - Média das vazões escoadas por orifício obtidas para os drenos com orifícios em formato *knife-cut* (Dreno KC) e em formato convencional, na condição de ausência (Dreno SM) e presença (Dreno CM) de material envoltório.

Sistema drenante	Vazão escoada por orifício (m ³ .h ⁻¹)
Dreno KC	0,01014 b
Dreno SM	0,12823 a
Dreno CM	0,00953 c

Legenda: Valores seguidos por letras iguais não diferem entre si pelo teste Scott-Knott, a 5% de significância.

Fonte: do autor (2025).

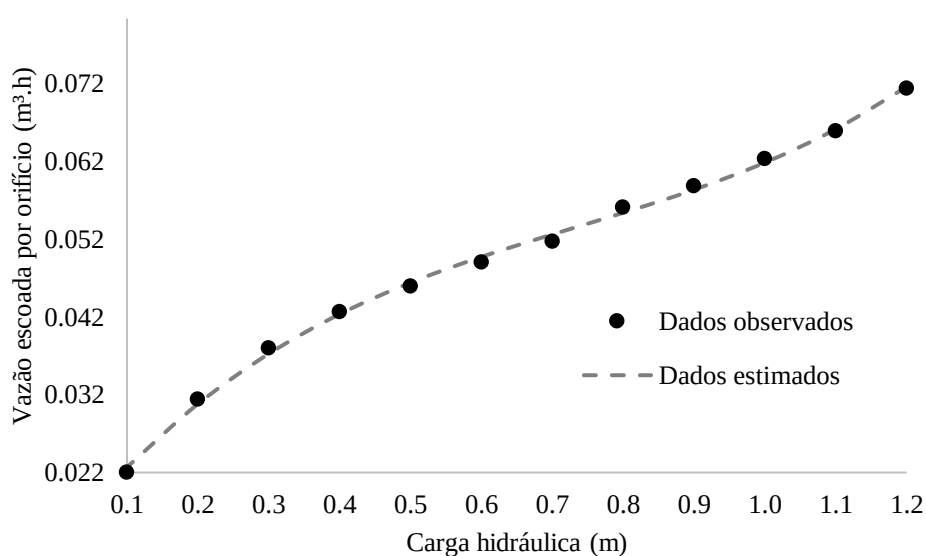
Mohamed e Abouzeid (2005) estudaram o comportamento do fluxo de água através de tubos de drenagem com diferentes razões de áreas de abertura, que foram expostos a diferentes cargas hidráulicas. Os autores constataram, para todas as cargas hidráulicas aplicadas, que a taxa de entrada de água nos drenos é diretamente proporcional a razão da área de abertura dos orifícios, o que corrobora com as vazões médias obtidas em função dos diferentes sistemas drenantes deste trabalho (Tabela 2.3). Estes autores relataram que a resistência de entrada dos drenos decresce com o aumento da razão da área de abertura dos seus orifícios, que apesar de não muito expressivo, também foi constatado neste trabalho. Estas correlações positivas entre área de abertura, resistência de entrada e vazão escoada também foram constatadas por Yang et al. (2023), que ressaltaram que, para drenos com uma mesma área de abertura, o padrão de distribuição dos orifícios ao longo das paredes do tubo pode influenciar a vazão drenada.

Notou-se, contudo, pela análise da Tabela 2.3, que apesar das dimensões e do padrão de distribuição dos orifícios dos Drenos SM e CM serem os mesmos, a média da vazão escoada pelo último sistema drenante foi inferior à do primeiro. Tal comportamento pode, em um primeiro momento, parecer contraditório devido ao processo de atuação do envoltório sobre o fluxo de água previamente apresentado, e considerando que um dos principais objetivos do uso de material envoltório em sistemas de drenagem subterrânea é facilitar o fluxo de água do solo através dos orifícios do tubo de drenagem (Byrne *et al.*, 2023a; Ghane *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2023). No entanto, espera-se que o envoltório atue como um agente facilitador do fluxo apenas quando empregado sob o solo, já que o bom desempenho deste material está associado, sobretudo, a sua capacidade de restringir a entrada indesejada de partículas sólidas nas tubulações e de manter o gradiente hidráulico do solo adjacente ao dreno baixo (Ding; Chang, 2020). Já na ausência de um meio poroso, infere-se que os envoltórios atuem como um fator redutor do potencial de entrada de água pelos orifícios do dreno, já que estes possuem uma certa porosidade. Assim, para que haja o escoamento para o interior do tubo, a água precisará

primeiramente atravessar os poros do envoltório, barreira física que, apesar de permeável, gera uma resistência hidráulica adicional, quando se compara ao tubo sem este material. Essa resistência aumenta a taxa de ocorrência da perda de carga ao longo do trajeto percorrido pela água, o que reduz o influxo da água, o que justifica os resultados de vazão obtidos neste trabalho (Tabela 2.3).

Na Figura 2.5 pode ser visto o efeito simples da fonte de variação “carga hidráulica” sobre a vazão escoada por orifício. A estimativa desse efeito foi melhor representada por uma função cúbica, com R^2 de 99,83%.

Figura 2.5 - Efeito da fonte de variação carga hidráulica sobre a vazão escoada por orifício.



Equação de ajuste: $Y = 0,014389x^3 - 0,031782x^2 + 0,031056x + 0,003429$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 99,83%.

Fonte: do autor (2025).

Observou-se, pela análise da Figura 2.5, que à medida que a carga hidráulica aplicada sobre os sistemas drenantes aumentava, a vazão escoada por orifício também aumentava. Esse efeito pode ser explicado pelo princípio fundamental da hidrostática, que estabelece que a pressão de um fluido em equilíbrio, com densidade constante, varia linearmente com a profundidade; e pela equação dos orifícios, que é obtida a partir da aplicação da equação de Bernoulli e relaciona a velocidade de escoamento de um fluido por um orifício hidráulico com a carga hidráulica atuante sobre o orifício (Azevedo Netto; Fernández, 2018; Hansen, 2023; Qin; Duan, 2017; Ramos *et al.*, 2020). Dessa forma, como a pressão atuante sobre os orifícios desobstruídos do dreno no aparato experimental é resultante do somatório entre a pressão atmosférica e a pressão exercida pela coluna d'água, ao atingir o equilíbrio hidráulico quanto

maior a coluna d'água, ou seja, a carga hidráulica, maior a pressão exercida sobre estes orifícios. Ao aumentar a pressão sobre os orifícios, que apresentam área de abertura constante, a velocidade com que o fluido escoar através das perfurações aumenta, havendo, portanto, um aumento da vazão drenada.

As médias das vazões escoadas por orifício, para o desdobramento da fonte de variação “sistema drenante” dentro de cada nível do fator “carga hidráulica”, podem ser visualizadas na Tabela 2.4. Para todas as cargas hidráulicas aplicadas, as médias apresentadas para a vazão escoada por orifício do Dreno SM foram estatisticamente diferentes e superiores às médias apresentadas para os demais sistemas drenantes. As médias obtidas para os Drenos KC e CM foram estatisticamente semelhantes para as cargas hidráulicas de 1,1; 1,0; 0,3; 0,2 e 0,1 m. No entanto, verificou-se que, apesar de próximas em magnitude, as médias obtidas para o Dreno KC foram majoritariamente superiores, exceto para a carga hidráulica de 1,2 m, o que pode indicar uma mudança no comportamento hidráulico do Dreno CM.

Tabela 2.4 - Desdobramento da fonte de variação sistemas drenante dentro de cada nível do fator carga hidráulica.

Carga hidráulica (m)	Vazão média escoada por orifício (m ³ .h ⁻¹)		
	Sistema drenante		
	Dreno KC	Dreno SM	Dreno CM
1,2	0,01688 c	0,16953 a	0,02677 b
1,1	0,01619 b	0,16357 a	0,01697 b
1,0	0,01513 b	0,15739 a	0,01347 b
0,9	0,01357 b	0,15080 a	0,01112 c
0,8	0,01225 b	0,14565 a	0,00941 c
0,7	0,01105 b	0,13512 a	0,00941 c
0,6	0,00989 b	0,12968 a	0,00658 c
0,5	0,00854 b	0,12268 a	0,00573 c
0,4	0,00709 b	0,11521 a	0,00481 c
0,3	0,00555 b	0,10325 a	0,00435 b
0,2	0,00365 b	0,08611 a	0,00363 b
0,1	0,00190 b	0,05977 a	0,00359 b

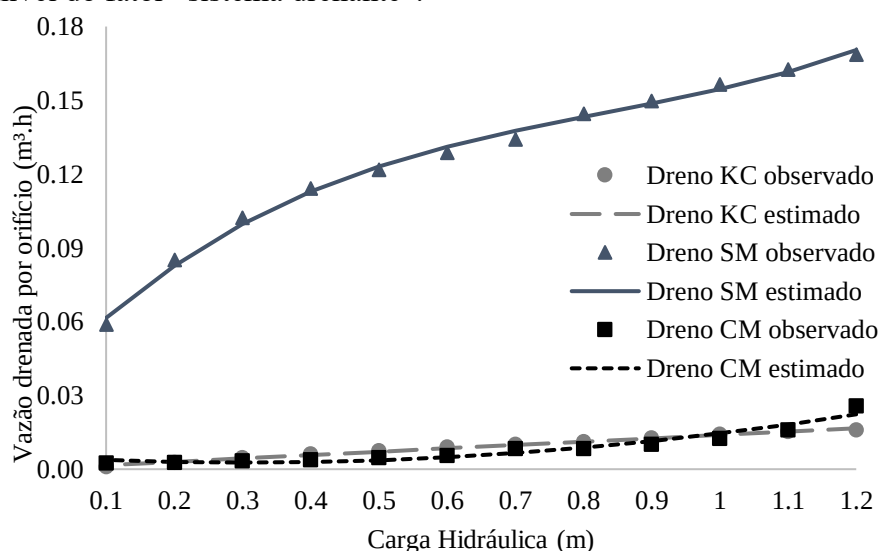
Legenda: Valores seguidos da mesma letra nas linhas, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: do autor (2024).

Na Figura 2.6 pode ser visualizado o efeito do desdobramento da fonte de variação “carga hidráulica” dentro de cada nível do fator “sistema drenante”. Nesta avaliação, foram constatadas diferenças significativas para todas as interações realizadas, sendo que para o Dreno KC, a equação que melhor se ajustou às variáveis observadas foi a polinomial de primeiro grau,

com R^2 igual a 99,28%. Já para o Dreno CM, foi a equação polinomial de segundo grau, com R^2 igual a 94,71%, enquanto para o Dreno SM, uma polinomial de terceiro grau, com R^2 igual a 99,59%.

Figura 2.6 - Efeito do desdobramento da fonte de variação “carga hidráulica” dentro de cada nível do fator “sistema drenante”.



Equações de ajuste: Dreno KC = $0,003783x + 0,000359$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 99,28%; Dreno CM = $0,006827x^2 - 0,004185x + 0,001669$, com R^2 igual a 94,71%; Dreno SM = $0,031964x^3 - 0,079375x^2 + 0,080510x + 0,010077$, com $R^2 = 99,54\%$.

Fonte: do autor (2025).

Observou-se, pela análise da Figura 2.6, que a magnitude das vazões escoadas por orifício pelos Drenos KC e CM foi semelhante e inferior à magnitude das vazões escoadas pelo Dreno SM, o que, mais uma vez, corrobora com os resultados previamente obtidos. Além disso, percebeu-se que o comportamento do incremento da vazão escoada por orifício em função do aumento da carga hidráulica dos Drenos KC, foi semelhante ao comportamento observado para o Dreno CM; e que estes incrementos foram mais tênues do que o observado para o Dreno SM. Portanto, constatou-se que a variabilidade da vazão escoada em função da carga hidráulica do Dreno SM foi maior que a variabilidade da vazão escoada apresentada pelos demais drenos. Por fim, notou-se para todos os sistemas drenantes, que quanto maior a carga hidráulica aplicada, maior a média obtida para a vazão drenada por orifício.

Os valores obtidos pelo ajuste único do coeficiente de descarga e R^2 de cada sistema drenante foram, respectivamente, iguais à 0,328 e 99,33% para o Dreno KC; 0,575 e 98,84% para o Dreno SM; e 0,046 e 69,64% para o Dreno CM, respectivamente. Este coeficiente é um parâmetro adimensional que expressa a relação entre a vazão real e a vazão máxima (teórica) esperada através de um orifício hidráulico. Está intrinsecamente relacionado à perda de carga

que ocorre no sistema devido ao estreitamento do fluxo, que é ocasionado pela resistência à entrada de água, exercida pelo orifício. Assim sendo, este parâmetro descreve a eficiência com que um fluido flui através de um orifício hidráulico (Wadhwa, 2022; Zaiter; Sabtu; Almaliki, 2024). Portanto, foi constatado que a capacidade de drenagem do sistema drenante SM é, aproximadamente, 13 vezes superior à do Dreno CM, já que, ao manter todas as outras variáveis da equação dos orifícios constantes, quanto maior o coeficiente de descarga, maior a vazão que escoar através dos orifícios (Equação 2.5). Esta constatação corrobora as médias de vazão apresentadas na Tabela 2.4 para estes sistemas drenantes.

Pela análise dos valores obtidos de R^2 para o ajuste da equação de orifícios, constatou-se que o sistema drenante que apresentou melhor adequabilidade ao uso da Equação dos Orifícios para a descrição de seu comportamento hidráulico foi o Dreno KC, seguido, nesta ordem, pelos Dreno SM e CM. No entanto, como o valor de R^2 apresentado para a equação de orifícios para o Dreno CM foi inferior a 70%, uma nova análise de regressão foi conduzida, dessa vez ajustando o coeficiente de descarga e o expoente de carga de forma concomitante (Equação 2.5). Os novos valores obtidos para estes parâmetros foram iguais a $1,831 \times 10^{-12}$ e 1,75, respectivamente, com um R^2 igual de 89,50%. Tal fato sugere que o ajuste simultâneo do coeficiente de descarga e do expoente de carga pode resultar em um modelo matemático que apresente maior confiabilidade o comportamento hidráulico dos orifícios deste sistema drenante.

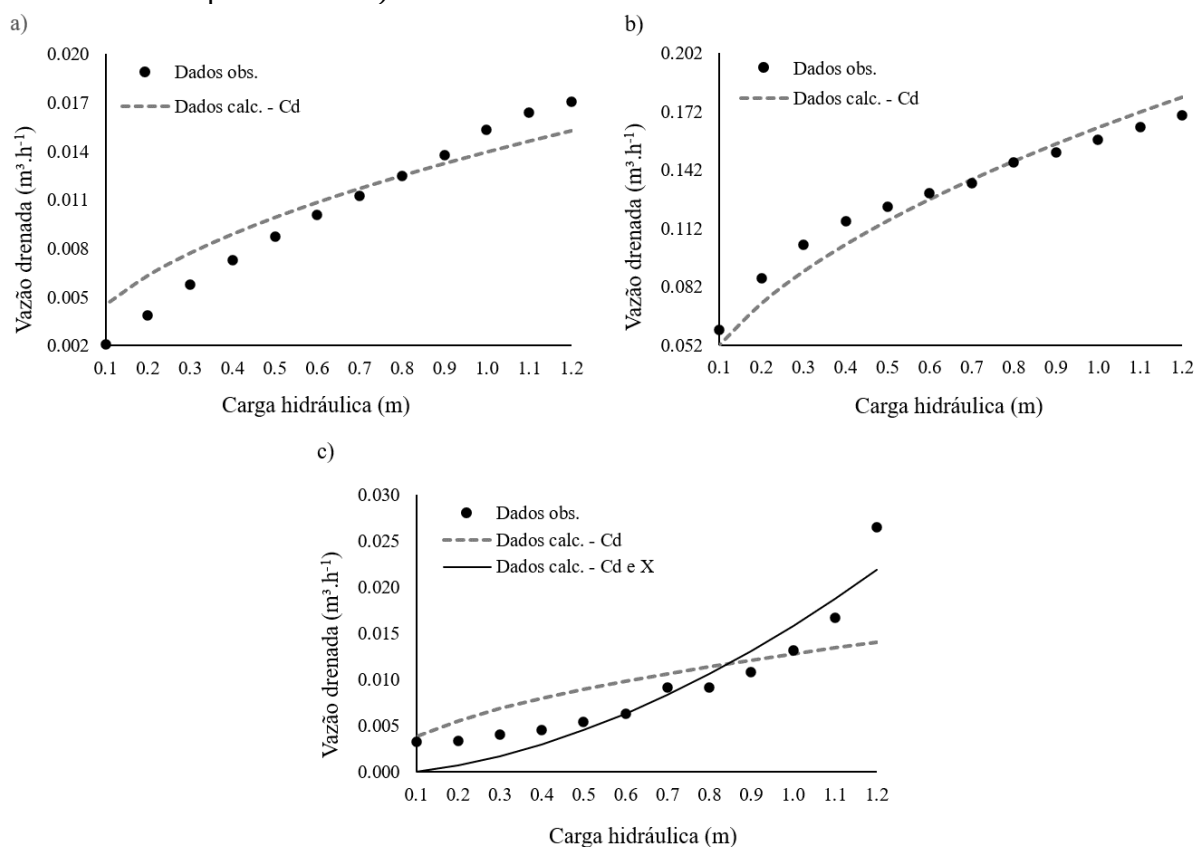
O expoente de carga da equação de orifícios expressa a relação entre o fluxo que flui através de um orifício e a diferença de pressão existente entre os dois lados deste orifício. Essa diferença de pressão acontece devido a resistência de entrada causada pela permeabilidade parcial dos drenos, já que os orifícios para a passagem de água destes tubos representam, no máximo, cerca de 1 a 2% do total de sua parede (Dierickx, 1999; Gaj; Madramootoo, 2021). Então, pelo teorema de Bernoulli, tem-se que ao reduzir a área de passagem, a velocidade do fluido aumenta e a pressão estática, diminui.

Assim, este expoente descreve como a carga hidráulica influencia o fluxo através do orifício, sendo que quanto maior seu valor, maior é a sensibilidade da vazão escoada às variações da carga hidráulica (Farley; Trow, 2015; Greyvenstein; van Zyl, 2007). Portanto, como o valor do expoente de carga ajustado para o Dreno CM (1,75) foi maior que o valor teórico que normalmente é utilizado na equação de orifícios (0,5), infere-se que a vazão escoada por este sistema drenante é mais suscetível a variação da carga hidráulica do que à dos outros sistemas estudados. Contudo, o valor apresentado para o C_d deste dreno foi baixo ($1,831 \times 10^{-12}$), o que contribui para que a variação da vazão escoada em relação a variação da carga

hidráulica seja menos expressiva, apesar o alto expoente de carga. Além disso, como, para este dreno, os maiores incrementos de vazão foram obtidos para as duas maiores cargas hidráulicas aplicadas (Tabela 2.4), infere-se que cargas de pressão mais elevadas, possivelmente acima de 1,0 m, são capazes de suprimir a resistência ao influxo ocasionado pelo emprego de envoltório ao redor dos drenos. No entanto, como a carga hidráulica máxima aplicada neste trabalho foi igual a 1,2 m, não é possível tecer conclusão sobre o comportamento dos efeitos do emprego de envoltório sobre a resistência ao influxo.

Na Figura 2.7 estão apresentados as vazões observadas e as calculadas pela equação de orifícios ajustada para cada sistema drenante, considerando, para o Dreno CM, o ajuste único e concomitante do coeficiente de descarga com o expoente de carga.

Figura 2.7 - Vazão drenada observada (Dados obs.) e calculada pela equação de orifícios ajustada (Dados calc. - Cd) para o sistema drenante KC (a); SM (b) e CM (c), considerando, para este último, o ajuste único e concomitante do coeficiente de descarga com o expoente carga (Dados calc. - Cd; e Dados calc. - Cd e X, respectivamente).



Fonte: do autor (2025).

Observou-se, pela análise da Figura 2.7, que as vazões obtidas pelo ajuste da equação de orifícios para os Drenos KC e CM, na condição de ajuste único, superestimaram a vazão

escoada observada até as cargas hidráulicas de 0,8 e 0,9 m, respectivamente. A partir desses pontos, a vazão observada de ambos os sistemas passou a ser subestimada. Para o Dreno SM foi observado um comportamento semelhante, porém de forma inversa, ou seja, a vazão observada foi subestimada até a carga hidráulica de 0,6 m, a partir de onde passou a ser superestimada. Já para o Dreno CM na condição de ajuste concomitante, observou-se que a vazão calculada subestimou a vazão observada até a carga hidráulica de 0,5 m. Em seguida, houve uma superestimativa da vazão observada até a carga hidráulica 0,6 m, seguida por uma subestimativa na carga hidráulica de 0,7 m. Posteriormente, uma superestimativa até a carga de 1,1m, seguida por outra transição para subestimativa da vazão observada.

Já os valores obtidos para o coeficiente de descarga específico pelo ajuste único do coeficiente de descarga dos Drenos KC, SM e CM foram, nesta ordem, iguais à $126,538 \text{ m}^{-2}$; $32,257 \text{ m}^{-2}$; e $2,582 \text{ m}^{-2}$. Este parâmetro normaliza o coeficiente de descarga pela área de abertura do dreno, e, por isso, quanto maior seu valor, maior a capacidade de cada dreno permitir o fluxo de água em relação à área disponível para o escoamento. Logo, em termos de capacidade de permitir o fluxo de água em relação à área disponível para o escoamento, o Dreno KC possui uma capacidade aproximadamente 4 vezes maior do que o Dreno SM e 48 vezes superior à do Dreno CM. Por sua vez, o Dreno CM apresenta uma capacidade de drenagem aproximadamente 13 vezes inferior à do Dreno SM.

Na Tabela 2.5 estão apresentados os valores obtidos para o coeficiente de descarga parcial. Observou-se, para todos os sistemas drenantes, que os valores obtidos para este parâmetro variaram em função do sistema drenante e da carga hidráulica. O menor índice apresentado para o desvio padrão do C_d parcial em relação ao C_d geral foi obtido para o Dreno CM, na condição de ajuste concomitante, o que sugere, mais uma vez, a eficácia do ajuste concomitante do coeficiente de descarga e expoente de carga da equação de orifícios. Na sequência, os menores desvios-padrão apresentados foram para o Dreno CM, na condição de ajuste único, seguido pelos Drenos SM e KC. Nos casos em que o R^2 obtido pelo ajuste único do C_d geral for baixo, recomenda-se realizar o ajuste concomitante com o expoente de carga, pois, apesar da diferença entre os valores de R^2 ser pequena (0,7% a 10%), o ajuste concomitante é mais representativo.

Tabela 2.5 - Coeficiente de descarga parcial obtido para cada carga hidráulica e sistema drenante estudado.

Carga Hidráulica, m	Cd parcial			
	Dreno KC	Dreno SM	Dreno CM	
			ajuste único	ajuste concomitante (x 10 ⁻¹⁰)
1,2	0,369	0,544	0,086	0,0460
1,1	0,368	0,549	0,057	0,0402
1,0	0,361	0,554	0,047	0,0502
0,9	0,342	0,559	0,041	0,0500
0,8	0,327	0,573	0,037	0,0506
0,7	0,315	0,568	0,040	0,0630
0,6	0,305	0,589	0,030	0,0808
0,5	0,288	0,610	0,029	0,1130
0,4	0,268	0,641	0,027	0,1910
0,3	0,242	0,663	0,028	0,3050
0,2	0,195	0,677	0,029	0,4970
0,1	0,143	0,665	0,040	1,8600
Cd geral	0,328	0,575	0,046	0,0183
Σ Erro ²	6,97 x 10 ⁻²	3,44 x 10 ⁻²	3,47 x 10 ⁻³	4,74 x 10 ⁻²²
Desvio padrão em relação ao Cd geral	7,62 x 10 ⁻²	5,36 x 10 ⁻²	1,70 x 10 ⁻²	6,29 x 10 ⁻¹²

Fonte: do autor (2025).

Ressalta-se que a alteração dos valores do coeficiente de descarga é um reflexo da perda de energia do fluido ao escoar através do orifício. Por isso, este parâmetro não apresenta um valor fixo, já que pode ser influenciado por diversos fatores, como o material do tubo, geometria dos orifícios, regime e velocidade de escoamento, carga hidráulica a montante do orifício, entre outros (Alsaydalani, 2023; Zaiter; Sabtu; Almaliki, 2024). Sendo assim, orifícios com diferentes geometrias podem apresentar diferentes coeficientes de descarga, mesmo sob as mesmas condições de fluxo, o que condiz com os resultados apresentados neste trabalho.

Considerando os valores referentes à área de abertura dos orifícios (Tabela 2.1) e as vazões médias escoadas por orifício de cada sistema drenante (Tabela 2.3), calculou-se, pela equação da continuidade, que a velocidade média de entrada de água por orifício dos Drenos KC e SM são, respectivamente, iguais à 1,07 e 2,00 m.s⁻¹. Como fluxos de entrada com velocidades maiores estão associados à maior probabilidade de erosão e transporte de sólidos (Alavi *et al.*, 2021; Bahçeci *et al.*, 2018; Ghane, 2022b; Oyarce *et al.*, 2017), têm-se que as chances de obstrução do dreno com orifícios convencionais são superiores à do Dreno KC.

Essa inferência também pode ser realizada considerando a área de abertura dos orifícios (Tabela 2.1), já que drenos com orifícios de dimensões menores, especialmente em termos de largura, como é o caso do Dreno KC, têm a tendência de limitar a passagem de partículas sólidas de maiores dimensões, funcionando de forma semelhante a um filtro, o que também contribui para a minimização dos riscos de entrada de sólidos e o assoreamento das tubulações (Ghane, 2022a, 2022c; Ghane *et al.*, 2022).

Por fim, embora a capacidade de admissão de água do Dreno SM seja superior, o Dreno KC se mostra uma alternativa viável para a drenagem em sistemas subterrâneos. O emprego de drenos tubulares com orifícios para a passagem de água estreitos e geometria mais alongada, como os em formato *knife-cut*, apresenta-se como uma alternativa simples, promissora e mais econômica para solucionar os problemas relacionados à obstrução por sólidos dos sistemas de drenagem subterrânea (Ghane, 2022a, 2022c; Ghane *et al.*, 2022).

2.1.4 CONCLUSÃO

O dreno convencional possui orifícios maiores e mais arredondados, resultando em menor resistência de entrada e maior raio efetivo em comparação ao dreno KC, que apresenta orifícios menores e mais alongados. O potencial de obstrução por sólidos do dreno com orifícios convencionais é superior à do Dreno KC. Quanto maior a carga hidráulica, maior a vazão escoada por orifício, sendo o Dreno SM o que apresenta a maior vazão, seguido pelo Dreno CM e, por último, o Dreno KC. O uso de envoltório na ausência de meio poroso aumenta a resistência hidráulica, resultando em maior perda de carga e menor influxo de água.

Em termos de capacidade de drenagem, o Dreno KC apresenta desempenho cerca de 4 vezes superior ao do Dreno SM e 48 vezes superior ao do Dreno CM, que, por sua vez, tem desempenho aproximadamente 13 vezes inferior ao do Dreno SM. Observou-se também a variação do coeficiente de descarga (C_d) em função da carga hidráulica, com uma possível redução da resistência ao influxo a partir de 1 m de carga. A equação de orifícios foi adequada para os Drenos KC e SM com ajuste apenas do coeficiente de descarga ($R^2 > 70\%$). Para o Dreno CM, foi necessário ajustar simultaneamente o coeficiente de descarga e o expoente de carga devido à influência do envoltório no comportamento hidráulico do sistema.

A busca por tecnologias que aprimorem o custo/benefício dos sistemas de drenagem subterrânea é fundamental para a produtividade agrícola e gestão hídrica. Contudo, a escassez de estudos recentes limita a inovação científica nesta área

REFERÊNCIAS

- ADNAN, Rana Muhammad *et al.* Prediction of hydraulics performance in drain envelopes using Kmeans based multivariate adaptive regression spline. **Applied Soft Computing**, v. 100, p. 107008, 2021.
- ALAVI, Seyed Abdollah *et al.* Performance evaluation of the Hydroluis drainpipe-envelope system in a saline-sodic soil. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106486, 2021.
- ALLRED, Barry *et al.* Time of day impact on mapping agricultural subsurface drainage systems with UAV thermal infrared imagery. **Agricultural Water Management**, v. 256, p. 107071, 2021.
- ALSAYDALANI, Majed Omar. Effect of orifice hydraulic and geometric characteristics on leakage in water distribution systems. **International Journal of GEOMATE**, v. 25, n. 107, p. 59–67, 2023.
- AZEVEDO NETTO, Jose Martiniano; FERNÁNDEZ, Miguel Fernández. **Manual de Hidráulica [livro eletrônico]**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2018.
- BAHÇECI, Idris *et al.* A new drainpipe-envelope concept for subsurface drainage systems in irrigated agriculture. **Irrigation and Drainage**, v. 67, n. May, p. 40–50, 2018.
- BATISTA, Manuel de Jesus *et al.* **Drenagem como instrumento de dessalinização e prevenção da salinização dos solos**. Brasília: SRH, 2002. v. 2ed
- BYRNE, Ian *et al.* Assessment of the hydraulic and filter performance of different drainage stone aggregates to elucidate an optimum size range for use in clay-textured soils. **Agricultural Water Management**, v. 278, n. 31, p. 108164, 2023a.
- BYRNE, Ian *et al.* Investigating the suitability of synthetic envelopes as an alternative or complement to stone aggregate in clay-textured soils in Ireland. **Geoderma Regional**, v. 32, p. e00598, 2023b.
- CHELIL, Samy *et al.* Variational data assimilation to improve subsurface drainage model parameters. **Journal of Hydrology**, v. 610, p. 128006, 2022.
- DIERICKX, Willy. **Electrolytic analogue study of the effect of openings and surrounds of various permeabilities on the performance of field drainage pipes**. Merelbeke: Rijksinstituut voor Landbouwtechniek, 1980.
- DIERICKX, Willy. **Non-ideal drains: Agricultural drainage**. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1999.
- DIERICKX, Willy; VAN DER MOLEN, W. H. Effect of perforation shape and pattern on the performance of drain pipes. **Agric. Water Manage**, v. 4, n. 4, p. 429–443, 1981.
- DING, Kunlun; CHANG, Xiaomin. Drainage and ecological service of irrigation schemes in China. **Irrigation and Drainage**, v. 69, p. 97–107, 2020.

ELLAFI, Murad A; DEEKS, Lynda K.; SIMMONS, Robert W. Application of artificial neural networks to the design of subsurface drainage systems in Libyan agricultural projects. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 35, p. 100832, 2021.

FARLEY, Malcolm; TROW, Stuart. Losses in Water Distribution Networks: A Practitioners' Guide to Assessment, Monitoring and Control. **Water Intelligence Online**, v. 4, n. 0, p. 9781780402642–9781780402642, 2015.

FERREIRA, Paulo Vanderlei. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. Maceió: EDUFAL, 1991.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, 37 (4), 529, 2019.

FERREIRA, Tiago; RASBAND, Wayne. **ImageJ user guide**. Usa: National Institute of Health, 2012.

GAJ, Naresh; MADRAMOOTOO, Chandra A. Effects of Perforation Geometry on Pipe Drainage in Agricultural Lands. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, n. 7, p. 04020015, 2020.

GAJ, Naresh; MADRAMOOTOO, Chandra A. Simulating upward soil-water flow from buried pipes with variable hydraulic characteristics. **Advances in Water Resources**, v. 158, p. 104074, 2021.

GHANE, Ehsan. Choice of pipe material influences drain spacing and system cost in subsurface drainage design. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 38, n. 4, p. 685–695, 2022a.

GHANE, Ehsan. Choosing between sock-wrapped and sand-slot pipes. **Michigan State Univesity**, 2022b.

GHANE, Ehsan. Drain Sedimentation Tool. **Michigan State Univesity**, v. E3455, 2022c.

GHANE, Ehsan *et al.* Knitted-sock geotextile envelopes increase drain inflow in subsurface drainage. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107939, 2022.

GHANE, Ehsan; ASKAR, Manal H.; SKAGGS, R. Wayne. Design drainage rates to optimize crop production for subsurface-drained fields. **Agricultural Water Management**, v. 257, p. 107045, 2021.

GREYVENSTEIN, B.; VAN ZYL, Jakobus Ernst. An experimental investigation into the pressure - leakage relationship of some failed water pipes. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 56, n. 2, p. 117–124, 2007.

GUO, Chenyao *et al.* Influence of clogging substances on pore characteristics and permeability of geotextile envelopes of subsurface drainage pipes in arid areas. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, n. 5, p. 735–746, 2020.

HANSEN, Anders Hedegaard. Fluids Mechanics. *In*: MOREAU, René; THESS, André (eds.). **Fluid Power Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 25–42.

HENINE, Hocine *et al.* Coupling of a subsurface drainage model with a soil reservoir model to simulate drainage discharge and drain flow start. **Agricultural Water Management**, v. 262, p. 107318, 2022.

KAUR, Harpreet *et al.* Drainage water management impacts soil properties in floodplain soils in the midwestern, USA. **Agricultural Water Management**, v. 279, p. 108193, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108193>. Acesso em: 13 jun 2024.

MENG, Jian *et al.* Study on the clogging mechanism of upward inclined drainage holes in cut slopes. **Frontiers in Earth Science**, v. 11, p. 1103323, 2023.

MINNES, Sarah *et al.* Transforming conflict over natural resources: A socio-ecological systems analysis of agricultural drainage. **Facets**, v. 5, n. 1, p. 864–886, 2020.

MOHAMED, Hassan I.; ABOUZEID, Gamal A. A. Flow Behavior Around Perforated Tile Drainage Pipes. *In*: NINTH INTERNATIONAL WATER TECHNOLOGY CONFERENCE. Egypt: Mansoura University, 2005. p. 1117–1129.

NRCS, Natural Resources Conservation Service. Chapter 14: Water management (Drainage). *In*: NRCS, **Part 650 Engineering Field Handbook - National Engineering Handbook**, 2001.

OYARCE, Patricio *et al.* Experimental Evaluation of Agricultural Drains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 4, p. 04016082, 2017.

PIMENTEL-GOMES, Frederico. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: Fealq, 2022.

QIN, Ruqiong; DUAN, Chunyi. The principle and applications of Bernoulli equation. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 916, p. 012038, 2017.

RAMOS, Lucas M. *et al.* An experiment to observe Stevin's law with an Arduino. **Physics Education**, v. 55, n. 3, p. 033004, 2020.

RASBAND, W. **ImageJ documentation**. [S. l.], 2011. Disponível em: www.rsb.info.nih.gov. Acesso em: 8 jan 2024.

SCHNEIDER, Caroline A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nmeth.2089>. Acesso em: 5 abr 2024.

SKAGGS, R. Wayne. Effect of drain tube openings on water-table drawdown. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. ASCE 104, p. 13–21, 1978.

SONG, Homin; WOO, D. K.; YAN, Q. Detecting subsurface drainage pipes using a fully convolutional network with optical images. **Agricultural Water Management**, v. 249, p. 106791, 2021.

STUYT, Louis C. P. M; DIERICKX, W.; BELTRÁN, J. M. **Materials for subsurface land drainage systems**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 60, rev. 1, 2005.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; SILVEIRA, André Luiz Lopes. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

VIANA, Joao Herbert Moreira; CLEMENTE, Eliane de Paula; OLIVEIRA, Aline Pacobahyba. **Procedimento Operacional Padronizado para Quantificação e Mensuração de Areias Via Análise de Imagens**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2016.

VLOTMAN, Willem F.; SMEDEMA, Lambert K.; RYCROFT, David W. **Modern Land Drainage**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2020.

WADHWA, Ajay. Study of coefficient of discharge through orifices. **European Journal of Physics**, v. 43, n. 1, p. 015702, 2022.

WIT, Janine A. *et al.* Development of subsurface drainage systems: Discharge – retention – recharge. **Agricultural Water Management**, v. 269, p. 107677, 2022.

WU, Zhe *et al.* Experimentally Based Numerical Simulation of the Influence of the Agricultural Subsurface Drainage Pipe Geometric Structure on Drainage Flow. **Agriculture**, v. 12, n. 12, p. 2174, 2022.

YANG, Haoyu *et al.* Effects of geotextile envelope and perforations on the performance of corrugated drain pipes. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 16, n. 1, p. 36–44, 2023. Disponível em: <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/7574>. Acesso em: 22 mai 2024.

YANNOPOULOS, Stavros I. *et al.* Evolution of the materials and methods used for subsurface drainage of agricultural lands from antiquity to the present. **Water**, v. 12, p. 1767, 2020.

ZAITER, Ali; SABTU, Nuridah; ALMALIKI, Doaa F. Equations and methodologies of inlet drainage system discharge coefficients: A review. **Open Engineering**, v. 14, n. 1, 2024.

2.2 ARTIGO 2 – DESCARGA E TRANSPORTE DE PARTÍCULAS SÓLIDAS EM DRENOS TUBULARES COM ORIFÍCIOS RANHURADOS

RESUMO

Drenos projetados para dispensar o uso de envoltório mostram-se promissores na drenagem subterrânea, no entanto, sua aplicação ainda é pouco difundida devido à escassez de estudos que comprovem seu desempenho. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar o desempenho de um dreno não convencional, com orifícios em formato de ranhuras estreitas e geometria alongada (Dreno KC), em relação a drenos convencionais com orifícios maiores e geometria arredondada. Para isso, foi desenvolvido um aparato experimental que permitiu quantificar a descarga e o carreamento de sólidos em diferentes meios porosos: arenoso, franco e caulim. Os resultados evidenciaram que as propriedades dos meios porosos influenciam diretamente o desempenho dos sistemas de drenagem, com as maiores taxas de descarga e de carreamento de sólidos observadas para o solo de maior permeabilidade e menor coesão. O dreno convencional com envoltório geotêxtil (Dreno CM) apresentou as maiores taxas de descarga, exceto no solo arenoso, onde o elevado teor de sólidos carregados sugeriu a colmatção do envoltório. O dreno KC (sem envoltório) possibilitou descargas mais estáveis ao longo do tempo, favorecendo a drenagem prolongada e a manutenção da estrutura dos meios porosos. Além disso, suas taxas de carreamento de sólidos são estatisticamente semelhantes às dos Drenos CM, evidenciando sua eficácia e aplicabilidade na drenagem subterrânea sem exigir a presença de envoltório.

Palavras-chave: drenagem subterrânea; *sand-slot pipes*; erosão hídrica; material envoltório; colmatção por partículas sólidas.

2.2 ARTICLE 2 - DISCHARGE AND TRANSPORT OF SOLID PARTICLES IN SLOTEED PERFORATED TUBULAR DRAINPIPES

ABSTRACT

Drainpipes designed to operate without envelopes have shown success in subsurface drainage systems; however, their adoption remains limited due to lack of studies demonstrating their efficiency. This study aimed to evaluate and compare the performance of a non-conventional drainpipe featuring narrow slotted perforations with an elongated geometry (KC Drainpipe) against a conventional drainpipe with larger, rounded perforations. An experimental setup was designed to quantify discharge and solid transport across different porous media: sandy, loamy, and kaolinitic soils. The results highlighted that the properties of the porous media have a direct impact on drainage system performance, with the highest discharge and sediment transport rates occurring in the soil with the greatest permeability and lowest cohesion. The conventional drainpipe with a geotextile envelope (CM Drainpipe) presented the highest discharge rates, except for sandy soil, where the high solid content suggested clogging of the envelope. The KC Drainpipe (without an envelope) provided more stable discharge over time, enabling prolonged drainage and preserving the structure of the porous media. Additionally, its solid transport rates were statistically similar to those of the CM Drainpipe, highlighting its effectiveness and suitability for subsurface drainage systems without requiring envelopes.

Keywords: subsurface drainage; sand-slot pipes; water erosion; geotextile envelope; sediment clogging.

2.2.1 INTRODUÇÃO

A drenagem subterrânea artificial é um processo sequencial que se inicia com a infiltração da água no meio poroso, onde é retida. À medida que o meio poroso perde umidade, a água desloca-se em direção aos drenos, exercendo uma força de arraste sobre as partículas do solo, que se intensifica à medida que se aproxima do sistema de drenagem (Li *et al.*, 2021). Se essa força supera as forças de resistência do solo, as partículas sólidas se desestabilizam e podem ser transportadas pelo fluxo de água para o interior dos tubos, onde se acumulam (Bovi *et al.*, 2022; Ravindran; Gratchev, 2022). A longo prazo, esse acúmulo de partículas sólidas pode resultar na obstrução e sedimentação dos drenos, comprometendo sua capacidade de descarga, consequentemente, a eficácia e durabilidade do sistema (Alavi *et al.*, 2021; Bahçeci *et al.*, 2018).

A vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica subterrânea está relacionada, principalmente, à coesão entre as partículas, que por sua vez é dependente da textura e estrutura do solo (Khanh; Pramanik; Ngoc, 2024; Ma *et al.*, 2024). Solos com maior teor de argila e matéria orgânica são mais resistentes à erosão em comparação aos arenosos, que apresentam menor coesão (Alavi *et al.*, 2021; Bahçeci *et al.*, 2018). Contudo, solos de textura mais grossa, como os arenosos, possuem uma fração maior de macroporos e, consequentemente, menor capacidade de retenção hídrica, o que lhes confere uma drenagem mais rápida em relação aos solos argilosos, que requerem maior tensão para a extração da água (Khanh; Pramanik; Ngoc, 2024; Phogat *et al.*, 2024).

Dessa forma, o bom desempenho e durabilidade dos sistemas de drenagem subterrânea estão diretamente associadas à sua capacidade de permitir o fluxo de água e controlar o carreamento de sólidos para o interior dos tubos. Nesse sentido, o uso de material envoltório ao redor dos drenos tem se mostrado eficaz para esse propósito, uma vez que suas funções básicas incluem facilitar o movimento da água do solo para o dreno enquanto restringem, até certo ponto, a entrada de sólidos no sistema (Yang *et al.*, 2023; Yannopoulos *et al.*, 2020). Contudo, esses materiais elevam o custo do sistema de drenagem, podem gerar resíduos associados ao transporte e descarte, dificultam a instalação dos drenos e estão sujeitos ao processo de colmatagem no caso de envoltórios com fibras geossintéticas. Esse fenômeno ocorre quando partículas sólidas ou microrganismos se acumulam nos poros do envoltório, obstruindo os espaços que permitem a passagem de água, o que reduz sua permeabilidade e, consequentemente, seu desempenho (Bahçeci *et al.*, 2018; Ghane, 2022a). Ademais, a presença de envoltório pode aumentar a permeabilidade na interface solo-dreno, elevando o fluxo da

água, o que por sua vez, potencializa a erosão hídrica subterrânea (Bahçeci *et al.*, 2018; Byrne *et al.*, 2023b).

Nesse contexto, Bahçeci *et al.* (2018) destacam a necessidade de desenvolver e implementar tecnologias que dispensem o uso de envoltórios convencionais e, ao mesmo tempo, reduzam a velocidade de influxo da água do solo para o dreno, para prevenir, assim, o risco de carreamento de partículas. Os tubos de drenagem do tipo *sand-slot*, desenvolvidos por empresas especializadas em drenagem nos EUA e Canadá, constituem uma alternativa economicamente viável para mitigar essa problemática. Esses tubos possuem orifícios projetados para restringir a entrada de partículas sólidas, com largura aproximada de 0,38 mm, promovendo uma baixa velocidade de fluxo de água devido à elevada resistência ao escoamento. Como resultado, os riscos de erosão hídrica e carreamento de sólidos são minimizados, dispensando a necessidade de envoltório, o que, por sua vez, reduz a geração de resíduos e os custos dos sistemas de drenagem, além de simplificar e agilizar a instalação dos drenos (Ghane, 2022c, 2022a; Ghane *et al.*, 2022).

No Artigo 1 desta tese, discute-se que, embora drenos com orifícios projetados para minimizar o carreamento de partículas sólidas e dispensar o uso de envoltório apresentem grande potencial para a drenagem subterrânea, sua aplicação ainda é pouco difundida. O uso reduzido destes drenos pode ser atribuído à escassez de informações e estudos científicos que comprovem seu desempenho em diferentes condições de solo e clima, o que retarda sua popularização e uso em larga escala. Apesar de estudos recentes abordarem a drenagem artificial como uma ferramenta de gestão hídrica, com ênfase no aprimoramento e automação do dimensionamento dos sistemas para torná-los mais eficientes e sustentáveis, pouco se discute sobre a simples estratégia de apenas redimensionar os orifícios dos drenos.

Ressalta-se que a drenagem artificial é essencial para prevenir o acúmulo de água na superfície, controlar o nível do lençol freático, mitigar a salinização dos solos e aumentar a produtividade agrícola (Abduljaleel *et al.*, 2023; Elnashar *et al.*, 2023; Kannazarova *et al.*, 2024; Kaur *et al.*, 2023; Takeshima *et al.*, 2023; Valipour *et al.*, 2020). Sua aplicação é frequente e de grande relevância em diversas regiões do mundo. Nesse contexto, tem-se a expectativa de que, caso o desempenho de um dreno projetado para uso sem envoltório seja comprovado, a instalação de sistemas de drenagem subterrânea possa ser simplificada, resultando em redução de custos e impactos ambientais. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um dreno projetado para uso sem envoltório. Para isso, foram comparadas as taxas de descargas de água e de sólidos carregados de dois tipos de drenos: um com orifícios considerados convencionais e outro em formato *knife-cut*, projetado para

dispensar o uso de envoltório e minimizar o carreamento de partículas sólidas e classificado como não convencional. A avaliação foi conduzida em modelo experimental considerando três tipos distintos de meios porosos distintos.

2.2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.2.1 Especificações dos tubos de drenagem estudados

Foram avaliados os mesmos sistemas drenantes apresentados e caracterizados no Artigo 1 (Figura 2.1 e Tabela 2.1), a saber: o “Dreno KC”, que apresenta orifícios menores, mais alongados e no formato *knife-cut*, que recebe esse nome devido à sua semelhança com um corte feito a faca; o “Dreno SM”, que possui orifícios maiores e com geometria arredondada, sendo considerado convencional no mercado; e o “Dreno CM”, que corresponde ao Dreno SM, mas com a adição de um envoltório de 100 mm feito em poliéster permeável e não tecido.

2.2.2.2 Desenvolvimento e operação do aparato experimental

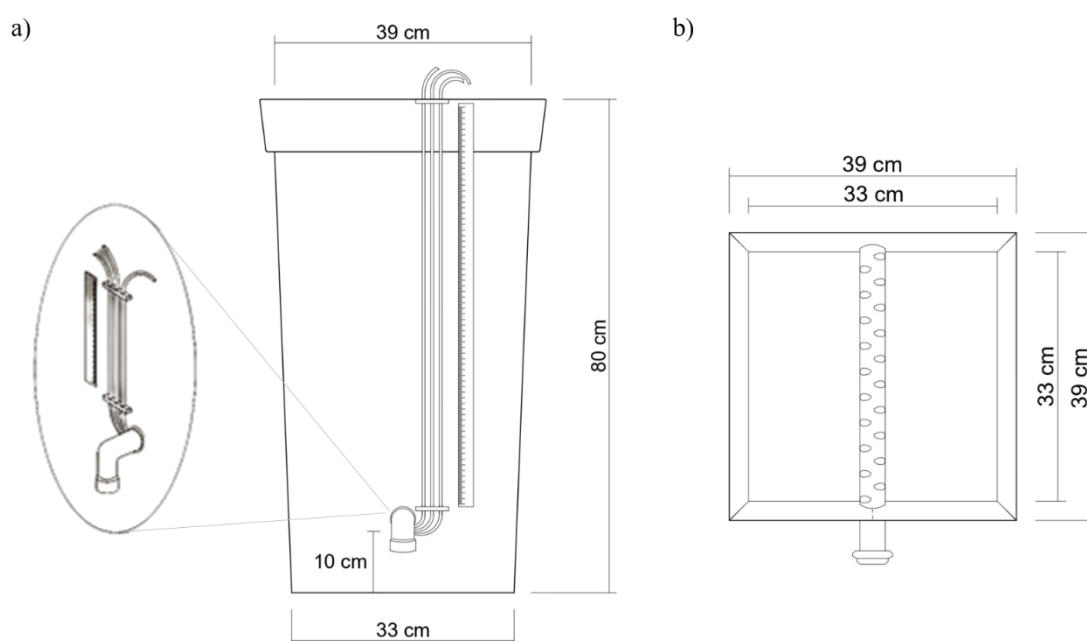
O experimento foi conduzido no Laboratório de Irrigação e Drenagem do Departamento de Recursos Hídricos (DRH) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais, Brasil, onde foi instalado um sistema experimental baseado no modelo físico descrito por Broughton, Chirara e Bonnell (1987). O sistema era composto por 09 aparatos, cada qual constituído por uma caixa plástica de polipropileno em formato tronco-piramidal, com capacidade de 100 L e dimensões de 0,80 m de comprimento, 0,39 m de base superior e 0,33 m de base inferior (Figura 2.8). Na parede externa de cada caixa, foram instalados, verticalmente, uma régua graduada de 0,60 m de comprimento e 3 mangueiras plásticas transparentes e flexíveis, com 0,70 m de comprimento e 3/8” de diâmetro, que foram vedadas com cola de silicone e atuaram como piezômetros para avaliar as cargas hidráulicas do sistema. Esses piezômetros foram dispostos perpendicularmente ao eixo longitudinal do dreno, a uma profundidade de 0,20 m, nas distâncias de 0,05, 0,10 e 0,15 m da interface solo-dreno.

Para reduzir a vazão de água necessária nos ensaios, apenas os orifícios de três anéis subsequentes foram mantidos abertos para a passagem de água, enquanto os demais foram vedados, conforme as recomendações apresentadas na seção 2.1.2 da metodologia do Artigo 1. Além disso, uma das extremidades dos drenos foi vedada com material impermeável e cola silicone. Em seguida, os drenos, com comprimento aproximado de 0,35 m, foram instalados a 0,10 m da base das caixas, de maneira centralizada e nivelada. Para isso, cada caixa foi perfurada na altura dos drenos com o auxílio de uma furadeira com serra tipo copo de 100 mm, e, em seguida, conectores de PVC com 25 mm de diâmetro foram fixados externamente. A

extremidade livre dos drenos foi conectada a um sistema de tubos e conexões, denominado ponto de descarga, que regulava o fluxo e direcionava a água drenada até um béquer de coleta. A sequência de montagem inclui um adaptador autoajustável, tubo de 15 cm, joelho soldável, adaptador curto e cap roscável. Todas as conexões foram previamente lixadas com lixa para metal P120 e vedadas com adesivo de PVC ou cola silicone para garantir estanqueidade.

Um esquema do aparato experimental, em vista frontal (a) e a planta baixa (b), pode ser visto na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Aparato experimental: em vista frontal (a) e a planta baixa (b).



Fonte: do autor (2025).

Três caixas foram preenchidas com meio poroso arenoso, outras três com meio poroso de textura franca e as últimas três com caulim, todos previamente secos ao ar por 48 horas. Para garantir homogeneidade, os meios porosos foram destorroados, peneirados e, então, distribuídos em camadas até atingir 55 cm de espessura em cada caixa plástica. Foram utilizados aproximadamente 140 kg de solo arenoso, 111 kg de solo franco e 124 kg de caulim.

A saturação dos meios porosos foi realizada com água tratada e fornecida pela UFLA, a qual foi distribuída aos aparatos através de um sistema simples de tubos e conexões de PVC (32 mm), com registros individuais. Esses registros estavam conectados a quatro tubos de PVC de 25 mm, que foram posicionados verticalmente nos cantos de cada caixa. Cada tubo possuía um cap roscável e pequenos orifícios em sua extremidade inferior, que permitiam a liberação controlada da água, promovendo uma saturação uniforme e ascendente dos meios porosos.

Os ensaios foram iniciados com a saturação dos meios porosos, fechando-se os pontos de descarga dos aparatos e abrindo-se o sistema de abastecimento de água. Esse processo foi conduzido de forma lenta e ascendente, em etapas, onde após aplicado uma pequena quantidade de água, aguardava-se cerca de 30 minutos para que houvesse sua redistribuição no meio poroso. O monitoramento da saturação foi realizado por meio dos piezômetros instalados. Após a constatação inicial da saturação, os reservatórios foram cobertos com uma manta plástica e deixados em repouso por 24 horas. Decorrido esse período, os níveis dos piezômetros foram novamente verificados para assegurar a saturação completa dos meios porosos.

Em seguida, os pontos de descarga foram abertos, promovendo o rebaixamento do nível freático e o início do processo de drenagem. Então, as cargas hidráulicas foram medidas e a vazão drenada medida em intervalos de tempo pré-determinados. Esse procedimento foi realizado de forma independente para cada sistema, até que, dentro de um intervalo contínuo de 15 minutos de observação, não fosse constatado fluxo nos modelos. Durante as primeiras 2,5 horas de observação, as cargas hidráulicas e vazão drenada eram aferidas a cada 5 minutos; em seguida, a cada 15 minutos durante mais 2,5 horas; depois, a cada 30 minutos por mais 7,5 horas; a cada 60 minutos nas 10 horas seguintes; e, por fim, a cada 2 horas, até a cessação do fluxo. A massa de água coletada em cada intervalo de tempo foi, então, convertida em volume, o que permitiu o cálculo da descarga dos sistemas pelo método volumétrico direto (Tucci; Silveira, 2009), conforme a Equação 2.4, apresentada no Artigo 1.

Após a pesagem da massa de água drenada em cada intervalo de tempo estabelecido, as amostras foram colocadas separadamente em recipientes individuais, permitindo que cada uma fosse tratada de forma independente. Essas amostras foram então levadas à estufa de ventilação forçada a 50 °C por 24 horas, permitindo a evaporação da água. Após o processo de secagem, cada amostra foi pesada em uma balança com exatidão de 0,0001 g, para a avaliação da relação entre a vazão drenada e o teor de sólidos carregados, além do comportamento dessas variáveis ao longo do tempo.

Por fim, foram calculados a descarga total, os sólidos carregados totais e o tempo de drenagem de cada sistema drenante. Esses valores foram obtidos por meio do somatório das descargas, dos sólidos carregados e dos tempos de drenagem até a cessação do fluxo em cada sistema. Além disso, para que fosse possível analisar estatisticamente o comportamento da descarga e sólidos carregados ao longo do tempo, foi realizada a avaliação das descargas e os sólidos carregados parciais. Para isso, após a constatação do fim do fluxo no primeiro aparato experimental, todos os tratamentos subsequentes foram finalizados, e os valores obtidos para essas variáveis foram avaliados.

2.2.2.3 Critérios de dimensionamento para orifícios de tubos de drenagem

Há normas que estabelecem critérios para o dimensionamento dos orifícios em tubos de drenagem, para que seja garantido, até certo ponto, que aconteça tanto a passagem da água do meio poroso para o dreno quanto a restrição da entrada de partículas sólidas. Essas normas geralmente se baseiam no parâmetro D85, que é determinado com base na análise granulométrica do meio poroso e se refere ao diâmetro da partícula abaixo do qual 85% do meio poroso é mais fino. A USCE (1955) recomenda que, para orifícios geometricamente mais alongados, o D85 seja inferior a 1,2 vezes a largura do orifício, e para orifícios mais arredondados, o D85 deve ser menor que essa largura. Já USBR (1973) sugere que, para ambos os casos, a largura dos orifícios seja menor que 2 vezes o D85. Já a norma DIN 4095 (1990) recomenda que os orifícios apresentem uma largura inferior a 3 vezes o D85. Por fim, a norma NBR 12212 (ABNT, 1992), específica para filtros de poços sem pré-filtro, estabelece que a ranhura deva ser capaz de reter de 30 a 50% do material poroso, sendo 50% para granulometrias menos uniformes.

2.2.2.4 Meios porosos estudados e sua caracterização física e hídrica

Para que fosse possível realizar a caracterização física e hidráulica dos meios porosos, ao final de cada repetição, foram coletadas e analisadas três amostras de cada meio poroso. A densidade (D_s), densidade de partículas (D_p), porosidade total (PT), microporosidade (M_i), macroporosidade (M_a) e condutividade hidráulica do meio poroso saturado (K_{sat}) foram determinadas no Laboratório de Física do Solo do DRH, seguindo as metodologias específicas descritas pela Embrapa (2017). Já a análise referente aos limites de consistência dos meios porosos foi realizada em uma empresa especialista em projetos geotécnicos, seguindo as especificações das normas NBR 6459 (2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.6.

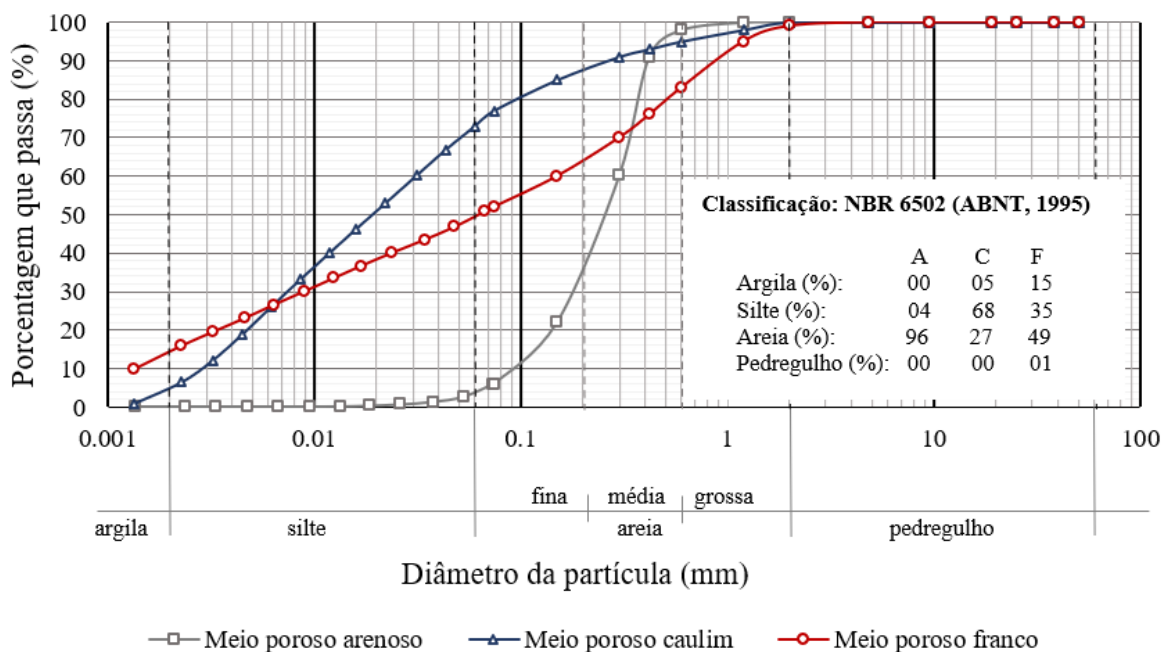
Tabela 2.6 - Densidade de partículas (Dp), densidade (Ds), porosidade total (PT), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), condutividade hidráulica do meio poroso saturado (Ksat) e limites de liquidez (LL), plasticidade (LP), e índice de plasticidade (IP) dos meios porosos estudados.

Meio poroso	Dp (g.cm ⁻³)	Ds (g.cm ⁻³)	PT (cm ³ .cm ⁻³)	Mi (cm ³ .cm ⁻³)	Ma (cm ³ .cm ⁻³)	K _{sat} (cm.s ⁻¹)	Limites de consistência (%)		
							LL	LP	IP
Arenoso	2,68	1,60	0,40	0,08	0,33	0,521	-	-	-
Caulim	2,75	1,43	0,48	0,41	0,07	0,001	36	25	11
Franco	2,69	1,27	0,53	0,37	0,15	0,003	40	27	13

Fonte: do autor (2025).

A análise granulométrica e a classificação das partículas dos meios porosos também foi em parceria com empresa especialista em consultoria e projetos geotécnicos. Para a granulometria, utilizaram-se as técnicas de peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016), e a classificação das partículas foi realizada de acordo com a norma NBR 6502 (ABNT, 1995). Os resultados obtidos para cada meio poroso estão apresentados na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Análise granulométrica do meio poroso arenoso (A), caulim (C) e franco (F) de acordo com a classificação ABNT – NBR 6502 (1995).

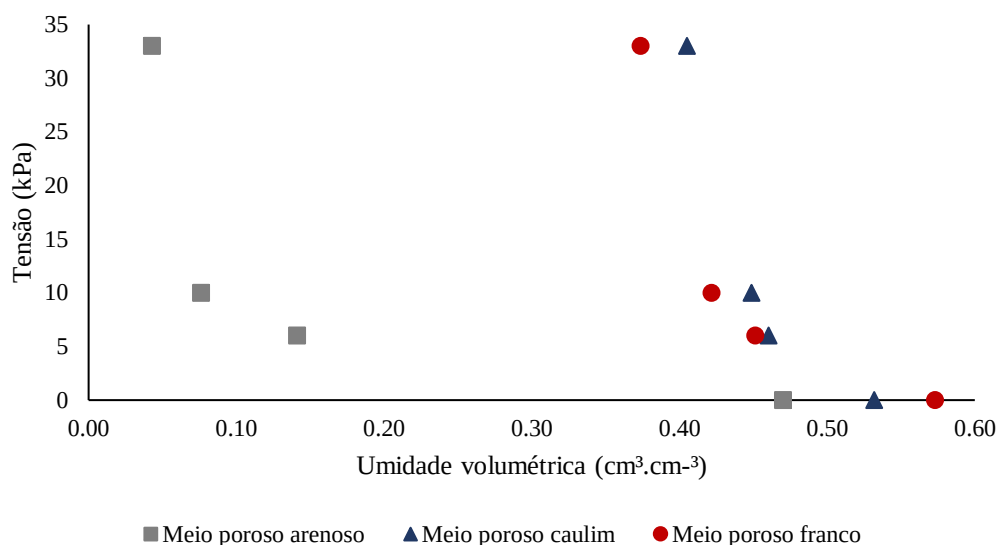


Fonte: do autor (2025).

Já a retenção de água pelos meios porosos foi determinada no Laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de

Montes Claros, de acordo com as metodologias propostas pela Embrapa (2017). Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Retenção de água pelos meios porosos arenosos, franco e caulim.



Fonte: do autor (2025).

2.2.2.5 Delineamento experimental e análise estatística

Foi conduzido um experimento fatorial em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), considerando duas fontes de variação: sistema drenante (3 categorias: dreno “CM”, Dreno “SM” e Dreno “KC”) e meio poroso (3 categorias: arenoso, franco e caulim), o que, com 3 repetições, resultou em 27 observações.

A análise individual das variáveis estudadas foi realizada por meio do teste F, à 5% de significância. Em casos de diferenças significativas, o efeito das fontes de variação qualitativas foi comparado pelo teste de Scott-Knott, com níveis de significância de 5%, enquanto o efeito das fontes de variação quantitativas foi avaliado por meio de regressão. Para todas as análises, foi utilizado o software AgroEstat (Barbosa; Maldonado Junior, 2015).

2.2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da análise de variância (ANOVA) realizada para a avaliação da descarga total e sólidos carregados totais nos sistemas drenantes, aplicados a cada um dos meios porosos avaliados, está apresentado na Tabela 2.7. Os resultados indicaram que todas as fontes de variação analisadas apresentaram efeito significativo, conforme o teste F.

Tabela 2.7 - Resumo da ANOVA para a descarga total e sólidos carregados totais para os sistemas drenantes aplicados em cada um dos meios porosos.

Fonte de variação	GL	QM	
		Descarga total	Sólidos carregados totais
MP	2	43,921203**	10285,982312**
SD	2	0,459106**	10363,791147**
MP x SD	4	0,110378**	10324.681844**
Erro	18	0,000600	0,456686
Total corrigido	26	-	-
CV (%)	-	1,5	3,39

Legenda: **: significativo ao teste F a 1% de probabilidade estatística. MP: meio poroso. SD: sistema drenante. GL: grau de liberdade. QM: quadrados médios. CV: coeficiente de variação.

Fonte: do autor (2025).

As médias das descargas totais e sólidos carregados totais obtidos para a combinação das fontes de variação estão apresentadas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Média das descargas totais e sólidos carregados totais obtidos para os drenos com orifícios em formato *knife-cut* (KC) e em formato convencional, na condição de presença (CM) e ausência (SM) de material envoltório, em cada um dos meios porosos.

Sistema drenante	Descarga total (L)			Sólidos carregados totais (g)		
	Caulim	Franco	Arenoso	Caulim	Franco	Arenoso
CM	0,139 Ca	0,903 Ba	4,303 Ab	0,393 Aa	0,140 Aa	0,167 Ab
SM	0,093 Cb	0,703 Bb	4,411 Aa	0,607 Ba	0,334 Ba	176,355 Aa
KC	0,078 Cb	0,258 Bc	3,773 Ac	0,391 Aa	0,216 Aa	0,332 Ab

Letras maiúsculas iguais na mesma linha e letras minúsculas iguais na mesma coluna indicam que, para cada variável resposta avaliada, não há diferença significativa a 5%, pelo teste de Scott-Knott.

Fonte: do autor (2025).

Para o desdobramento de meio poroso dentro de cada nível de sistema drenante, constatou-se que todas as médias de descarga total foram estatisticamente diferentes entre si

(Tabela 2.8). Além disso, independentemente do sistema drenante utilizado, as médias da descarga total para o meio poroso arenoso foram superiores às do meio poroso de textura franca que, por sua vez, foram maiores que às do caulim. Em relação aos sólidos carregados totais, apenas o sistema drenante sem manta apresentou diferenças estatísticas significativas entre os tipos de meio porosos, com o arenoso apresentando média significativamente maior em comparação aos meios porosos franco e caulim, que por sua vez foram semelhantes entre si. Esses resultados evidenciam, portanto, que as condições do meio poroso adjacente ao dreno afetam, de forma única, as taxas de descarga e de sólidos carregados dos sistemas de drenagem subterrânea (Saygin *et al.*, 2021; Khanh; Pramanik; Ngoc, 2024; Li *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2024).

As propriedades do meio poroso arenoso, conforme apresentadas nas Figuras 2.9 e 2.10 e Tabela 2.6, indicam uma estrutura altamente permeável, com rápida drenagem e baixa capacidade de retenção hídrica, o que pode ser atribuído aos grânulos de areia que conferem alta macroporosidade e baixa coesão (Khanh; Pramanik; Ngoc, 2024; Ma *et al.*, 2024). Contudo, apesar de favorecerem a rápida infiltração de água, a presença diminuta de partículas finas, como silte e argila, tornam esse meio poroso mais suscetível à erosão hídrica (Saygin *et al.*, 2021; Ravindran; Gratchev, 2022), explicando os resultados apresentados na Tabela 2.8. Por outro lado, meios porosos com textura mais fina, como o franco e caulim, apresentam uma maior capacidade de retenção de água nos microporos, o que limita a drenagem, como observado especialmente para o caulim, que apresentou a menor condutividade hidráulica entre os três meios porosos estudados (Khanh; Pramanik; Ngoc, 2024; Ma *et al.*, 2024). Contudo, esses meios porosos são mais coesos e plásticos, com limites de consistência classificados, de acordo com Caputo (1975), como moderados ($7 < IP < 15$), o que reduz a sua suscetibilidade à erosão (Caputo, 1975; Feng; Teng; Wang, 2023; O’Kelly, 2024). Essas características, portanto, resultam na redução da taxa de drenagem e carregamento de sólidos, reforçando a relação entre as propriedades dos meios poroso e a dinâmica de drenagem e carregamento de sólidos, conforme apresentado na Tabela 2.8.

Li *et al.* (2021) afirmam que a drenagem subterrânea artificial é um processo constituído de etapas, que se inicia com infiltração da água no meio poroso, onde é retida. Conforme o meio poroso perde umidade e sua saturação diminui, a água se move gradualmente em direção ao dreno, sendo drenada para os tubos se as tensões do meio poroso não forem suficientes para retê-la. Bovi *et al.* (2022), ressaltam que o movimento da água no meio poroso pode mobilizar e carrear partículas para dentro do sistema drenante, principalmente em situações de fluxo intenso, o que a longo prazo pode reduzir o desempenho do sistema.

Ressalta-se que as tensões atuantes sobre a água nos macroporos são menos intensas devido ao maior diâmetro desses poros, o que permite que água escoe sob a influência do potencial gravitacional. Já a água nos microporos está associada a forças capilares mais intensas, que exigem mais energia para sua extração, dificultando sua movimentação devido à influência do potencial matricial (Bharat; Gapak, 2021; Bovi *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2022). Portanto, a interação entre macro e microporos, juntamente com a conectividade entre eles, influencia a facilidade ou dificuldade com que a água irá se mover no meio poroso (Chavarría-Vidal; Miranda; Farias-Ramírez, 2020; Moussa *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2020). Por esse motivo, Phogat *et al.* (2024) discorrem que em solos argilosos, onde a fração de areia e macroporos é baixa, o fluxo de drenagem tende a ser mínimo sob condições de baixa sucção. Além disso, os autores constatarem que as partículas de silte presentes nos meios porosos podem obstruir o movimento da água, exigindo forças de sucção mais elevadas para atingirem um fluxo mínimo de drenagem. Portanto, infere-se que as baixas taxas de drenagem apresentadas na Tabela 2.8 para os meios porosos de textura franca e caulim se devam, principalmente, à elevada microporosidade destes, associadas às baixas condições de sucção do sistema.

Teoricamente, a erosão do meio poroso se inicia quando as forças coesivas que mantêm as partículas unidas são superadas por forças de desprendimento, geralmente causadas pelo impacto de chuva ou fluxo da água. Existe um gradiente hidráulico crítico que, ao ser atingido, resulta em um fluxo capaz de causar erosão (Bovi *et al.*, 2022). Saygin *et al.* (2021) e Ravindran e Gratchev (2022) comentam que, quanto maior o teor de areia ou umidade no meio poroso, menor tende a ser sua coesão. Portanto, a erosão hídrica é fortemente influenciada pelas características do fluxo da água, tipo de meio poroso e condições climáticas.

Alavi *et al.* (2021) e Bahçeci *et al.* (2018) afirmam que a obstrução de sistemas de drenagem subterrânea é um problema recorrente, especialmente em meios porosos com baixos índices de argila e matéria orgânica, componentes que conferem coesão ao meio poroso. De maneira semelhante, Ghane (2022b) constatou que, em meios porosos onde o teor de argila na profundidade de instalação dos drenos é inferior a 30%, o desempenho do sistema é frequentemente comprometida pela obstrução causada devido ao carreamento de partículas sólidas. Por outro lado, em meios porosos com teores de argila acima de 60%, essa adversidade tende a ser mínima ou inexistente, já que o carreamento de partículas sólidas é pouco provável. Portanto, os resultados apresentados na Tabela 2.8 corroboram essa observação, já que o meio poroso com maior teor de areia (Figura 2.9) apresentou os maiores índices de carreamento, enquanto o meio poroso franco e caulim, mesmo com teores intermediários de argila, mostraram baixos níveis de sólidos carregados totais. Contudo, como ressaltado por Vlotman,

Willardson e Dierickx (2001), em regiões áridas, onde os meios porosos apresentam menor estabilidade estrutural, apenas o teor de argila não basta como parâmetro preditivo da estabilidade.

Gabr, Fattouh e Eltarabily (2024) comentam que, devido à frequência de obstruções por sedimentação de sólidos, os custos de manutenção para lidar com esse problema muitas vezes acabam inclusos no orçamento total dos sistemas de drenagem subterrânea. Alguns dos meios porosos pré-dispostos à essa problemática são os arenosos, argilo-arenosos, franco-arenosos, francos, franco-siltosos e siltosos são geralmente mais suscetíveis ao carreamento (Byrne *et al.*, 2023a; Ghane, 2022; Stuyt; Dierickx; Beltrán, 2005), o que corrobora, mais uma vez, com os resultados obtidos na Tabela 2.8.

A análise do desdobramento de sistemas drenantes em cada tipo de meio poroso indicou diferenças estatísticas entre as médias de descarga total para todos os tratamentos (Tabela 2.8), exceto para o caulim, onde os sistemas convencionais sem envoltório (dreno CM) e com orifício no formato *knife-cut* (dreno KC), apresentaram médias estatisticamente iguais, indicando desempenho equivalente. Para os meios porosos franco e caulim, as maiores médias de descarga total foram observadas para o sistema drenante convencional com envoltório (dreno CM), seguidas pelo sistema drenante sem envoltório (dreno SM) e, por fim, pelo sistema com dreno *knife-cut* (dreno KC). No caso do solo arenoso, as médias mais elevadas foram obtidas para os sistemas drenantes sem e com envoltório.

Em relação aos sólidos carreados totais (Tabela 2.8), não foram observadas diferenças significativas entre as médias dos sistemas drenantes para os meios porosos franco e caulim. No entanto, para o meio poroso arenoso, a média do dreno SM foi significativamente superior às médias dos sistemas com manta e com dreno KC, que foram estatisticamente iguais. Assim, infere-se que, quanto ao carreamento de sólidos totais, o desempenho de sistemas de drenagem com drenos convencionais e material envoltório é semelhante ao dos sistemas com drenos KC, que não utilizam envoltório. Ademais, conclui-se que em meios porosos arenosos a ausência de material envoltório pode intensificar a tendência natural de mobilização e transporte de partículas sólidas nesse meio poroso.

Um dos principais objetivos do uso de envoltório é facilitar o influxo da água do meio poroso para o dreno, aumentando assim a taxa de descarga do sistema (Yang *et al.*, 2023; Yannopoulos *et al.*, 2020). O desempenho desses materiais está diretamente relacionada às suas características microestruturais e hidráulicas, especialmente o coeficiente de permeabilidade, que deve ser substancialmente superior ao do meio poroso adjacente ao dreno. Essa condição favorece a redução da resistência de entrada da água, o que facilita seu influxo para o dreno,

mesmo sob baixos gradientes hidráulicos (Alavi *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2025; Vlotman; Smedema; Rycroft, 2020; Yang *et al.*, 2023). Os resultados apresentados na Tabela 2.8 indicam que, para o solo franco e para o caulim, o dreno CM resultou nas maiores descargas totais, o que evidencia seu bom desempenho. Portanto, infere-se que seu coeficiente de permeabilidade foi superior ao dos meios porosos adjacentes aos drenos, o que reduziu a resistência de entrada e possibilitou maiores descargas. Contudo, se a condutividade hidráulica do meio poroso exceder a do envoltório, este material pode gerar uma resistência adicional ao fluxo ao natural da água, resultando em perdas de carga e de pressão que limitam o influxo da água (Ghane, 2022a), o que pode justificar os resultados apresentados na Tabela 2.8 para o solo arenoso.

Além da função hidráulica, os materiais envoltórios também atuam como filtros, admitindo a passagem de água enquanto restringem, até certo ponto, o carregamento de partículas sólidas para o interior dos drenos (Alavi *et al.*, 2021; Byrne *et al.*, 2023b; Yannopoulos *et al.*, 2020). Para isso, precisam possuir poros suficientemente grandes para permitirem o fluxo da água, mas pequenos o bastante para que possam reter as partículas do meio poroso, mantendo-as o mais estático possível para evitar seus transportes para o sistema (Ritzema, 2006; Stuyt; Dierickx, 2006). Contudo, estes materiais estão sujeitos ao processo de colmatagem no caso de envoltórios com fibras geossintéticas, fenômeno que ocorre quando partículas sólidas finas se depositam nos vazios do elemento drenante, reduzindo consideravelmente sua permeabilidade e, conseqüentemente, o desempenho do sistema (Ghane, 2022a). Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 2.8, observa-se que, para o meio poroso arenoso, o teor total de sólidos carregados foi maior no sistema drenante SM, enquanto a descarga total no sistema drenante CM foi inferior à deste último. Essa condição foi observada exclusivamente para esse meio poroso. Portanto, devido à elevada suscetibilidade desse meio poroso à erosão hídrica (Tabela 2.6) e ao alto teor de partículas finas presentes (Figura 2.9), infere-se que, essas partículas se mobilizaram pelo fluxo da água e foram transportadas até os envoltórios, onde, devido ao seu tamanho diminuto, acabaram se aderindo entre os poros do envoltório, resultando em colmatagem e, conseqüentemente, reduzindo a descarga total.

De acordo com as recomendações da Natural Resources Conservation Service (NRCS, 2001) (Figura 1.7), solos com alta fração de areia e baixo teor de finos são mais suscetíveis à erosão interna e ao transporte excessivo de partículas, tornando o uso de envoltório em sistemas de drenagem convencionais praticamente indispensáveis para mitigar esses processos. Considerando a curva granulométrica dos meios porosos estudados (Figura 2.9), essa abordagem facilita a compreensão dos padrões de carregamento de sólidos observados (Tabela 2.8) nos diferentes sistemas drenantes analisados (Tabela 2.1).

O solo arenoso (96% de areia e 4% de silte) se enquadra na categoria onde o uso de envoltório é necessário, justificando a recomendação de material envoltório. Por outro lado, o solo franco (49% de areia, 35% de silte, 15% de argila e 1% de pedregulho) e o meio poroso caulim (27% de areia, 68% de silte e 5% de argila), com maior teor de finos, apresentam maior estabilidade estrutural, o que pode tornar o envoltório dispensável, dependendo das condições hidráulicas. Os resultados experimentais da Tabela 2.8 confirmam essa tendência: nos meios porosos franco e caulim, os sólidos carregados foram baixos, independentemente do sistema drenante, enquanto no solo arenoso, o carregamento foi expressivo, especialmente no sistema com dreno convencional sem envoltório (SM), que atingiu 176,355 g devido aos orifícios maiores e à ausência de material envoltório. Contudo, embora as recomendações para solos arenosos indiquem o uso de areia e cascalho ou geotêxtil como material envoltório (Figura 1.7), este estudo sugere que o geotêxtil pode sofrer colmatção, comprometendo sua eficácia. Isso evidencia a complexidade da drenagem e a importância de escolher o envoltório adequado para cada tipo de solo. Nesse contexto, o dreno *knife-cut* (KC) se destaca por não exigir envoltório, eliminando o risco de colmatção e oferecendo uma solução eficiente e simples, especialmente para solos suscetíveis ao transporte de partículas.

Ghane (2022b) comenta que, de fato, sistemas drenantes com envoltório tendem a apresentar uma taxa de descarga superior em comparação aos sistemas com drenos do tipo KC, o que também foi constatado nesse trabalho (Tabela 2.8). De acordo com o autor, isso ocorre justamente porque o envoltório permite que o dreno tubular funcione, de certa forma, como um conduto aberto, minimizando as limitações impostas pela permeabilidade parcial de suas paredes, devido ao número finito de orifícios. Dessa forma, os envoltórios maximizam a entrada de água nos tubos, principalmente nos momentos iniciais de drenagem, quando a pressão no sistema tende a ser maior, aumentando o fluxo de drenagem e permitindo um rebaixamento mais rápido do lençol freático. Contudo, para solucionar essa limitação nos sistemas com drenos do tipo KC, basta reduzir o espaçamento lateral entre os drenos do sistema KC, o que compensa a menor permeabilidade. Ressalta-se que drenos com envoltório e do tipo KC, quando instalados na mesma profundidade e projetados para a mesma vazão drenada, apresentam um desempenho de drenagem muito semelhante. Por esse motivo, o autor destaca a importância de dimensionar corretamente o espaçamento entre drenos, principalmente em áreas sujeitas a chuvas intensas, para evitar que a intensidade das precipitações exceda a capacidade de admissão de água do sistema, evitando, assim, o acúmulo superficial de água no meio poroso e minimizando os riscos de atrasos em plantios devido ao excesso de umidade no meio poroso.

Bahçeci *et al.* (2018) e Byrne *et al.* (2023b) alertam que a utilização de envoltório em sistemas de drenagem subterrânea pode aumentar a velocidade da água no meio poroso adjacente ao dreno. Alavi *et al.* (2021) explicam que, em meios porosos saturados, o movimento água exerce uma força de arraste por fricção sobre as partículas, que se intensifica à medida que se aproxima do envoltório. Caso a magnitude dessa força supere às das resistências do meio poroso, as partículas começam a se desprender, podendo ser mobilizadas e transportadas para o interior dos drenos. Esse fenômeno é mais intenso na interface entre o meio poroso e o envoltório, onde as linhas de fluxo têm convergência máxima e aumentam a velocidade da água. Bahçeci *et al.* (2018) ressaltam que, ao longo do tempo, esse fenômeno pode resultar na colmatagem do envoltório e ou sedimentação dos tubos de drenagem. O risco é particularmente alto em áreas irrigadas, onde, após a irrigação, o lençol freático pode ultrapassar o nível dos drenos, aumentando a carga hidráulica e a velocidade de escoamento da água do meio poroso. Para mitigar esses efeitos, os autores sugerem o desenvolvimento de tecnologias que dispensem a necessidade de envoltórios convencionais e reduzam a velocidade de influxo da água, diminuindo assim o risco de carreamento de partículas.

A caracterização hidráulica dos drenos estudados é apresentada na seção 2.3 do Artigo 1 desta tese. Os valores obtidos para o fator de resistência de entrada foram 0,39 e 0,32 para o dreno com orifícios no formato *knife-cut* e convencional, respectivamente. Já o raio efetivo foi de 0,42 cm para o dreno KC e 0,65 cm para o dreno convencional. Assim, o dreno convencional, com orifícios de maior área de abertura, apresentou menor resistência de entrada e maior raio efetivo em comparação ao dreno KC, cujos orifícios têm área de abertura menor.

Já as vazões médias escoadas por unidade de comprimento para os drenos CM, SM e KC foram 12,74, 171,32 e 13,55 m³.h⁻¹, respectivamente (seção 2.3 do Artigo 1 desta tese). Assim, a vazão do dreno SM foi aproximadamente 13 vezes superior à do dreno KC, resultado atribuído às maiores dimensões geométricas dos orifícios do primeiro tubo em relação ao segundo, o que possibilitou uma taxa de entrada de água maior no sistema. Contudo, apesar das dimensões e padrão de distribuição dos orifícios dos drenos CM e SM serem as mesmas, a vazão escoada pelo dreno com envoltório foi inferior. Isso se explica pelo fato de que, embora permeável, o envoltório atua como uma barreira física, que, na ausência de meio de poroso, gera uma resistência hidráulica adicional, que aumenta a perda de carga e reduz o influxo da água.

Já os coeficientes de descargas específicos dos drenos CM, SM e KC foram, conforme apresentados na seção 2.3 do Artigo 1 desta tese, respectivamente, 2,582 m⁻², 32,257 m⁻² e 126,538 m⁻². Esse parâmetro ajusta o coeficiente de descarga com base na área de abertura dos

orifícios para a passagem de água de cada dreno, indicando que, quanto maior o valor, maior a capacidade de admissão de água em relação a área disponível para o escoamento. Assim, o dreno KC mostrou-se cerca de 4 vezes mais eficiente que o dreno SM e 48 vezes mais eficiente que o CM, o qual, por sua vez apresentou uma capacidade de drenagem aproximadamente 13 vezes inferior à do dreno SM.

Portanto, dado aos resultados apresentados no Artigo 1 desta tese e as relações entre as grandezas geométricas dos orifícios e a capacidade de drenagem do sistema, era esperado que o sistema drenante com dreno tipo *knife-cut* apresentasse as menores médias de descargas, o que corrobora com os resultados apresentados para a descarga total na Tabela 2.8. Isso porque, quando comparado à orifícios com área de abertura maior, orifícios menores limitam o espaço disponível para a passagem da água do meio poroso para o dreno, aumentando a resistência de entrada e, conseqüentemente, as forças necessárias para que a água vença a pressão de entrada e atravesse a barreira dos orifícios, resultando em menores descargas totais (Gaj; Madramootoo, 2020; Ghane, 2022a; Mohamed; Abouzeid, 2005; Yang *et al.*, 2023). Essa limitação foi ainda mais evidente para o caulim e, principalmente, para o solo franco, o que provavelmente ocorreu devido às suas menores condutividades hidráulicas e maiores capacidades de retenção de água, que intensificaram as forças necessárias para que a água escoasse. Além disso, caso durante o escoamento da água tivesse ocorrido o aprisionamento do ar próximo à interface meio poroso-dreno, as forças necessárias para que a água atravessasse os orifícios eram ainda maiores (Li *et al.*, 2021). Portanto, essa combinação de fatores pode explicar as menores taxas de descarga que foram observadas para o dreno KC nos meios porosos de textura franca e caulim

Em meios porosos não saturados, o aprisionamento de ar nos poros pode reduzir a o bom desempenho da drenagem, já que, à medida que a água se infiltra no meio poroso, o ar presente pode se deslocar, gerando bolsões que aumentam a resistência ao fluxo da água em direção ao dreno, o que reduz a taxa de infiltração. Essa situação se agrava quando a taxa de aplicação de água, seja por chuvas intensas ou irrigações, excede a capacidade de infiltração do meio poroso. Nesse cenário, o acúmulo de água na superfície aumenta a pressão sobre o meio poroso, comprimindo o ar nas camadas inferiores, o que eleva a resistência de entrada e reduz a condutividade hidráulica, limitando a continuidade do fluxo de água. Em meios porosos bem aerados, o ar se dissipa facilmente, permitindo que a água se mova rapidamente pelos poros do meio poroso, mas dificultando seu acúmulo ao redor do dreno. Assim, embora a boa aeração acelere o fluxo da água, a menor acumulação ao redor dos orifícios do dreno dificulta a geração da pressão necessária para que a água supere a resistência de entrada nos tubos (Li *et al.*, 2021). Dessa forma, infere-se que a alta permeabilidade do meio poroso arenoso quando saturado

(Tabela 2.6) favoreceu o rápido escoamento inicial da água, limitando seu acúmulo ao redor dos orifícios do dreno. Além disso, à medida que a umidade do meio poroso diminuía e as forças de retenção consequentemente aumentavam, a condutividade hidráulica do solo reduzia-se drasticamente, o que, por sua vez, limitava a continuidade do fluxo de água. Essa condição dificultou que a água alcançasse uma pressão suficientemente alta para superar a resistência de entrada impostas pelos orifícios, que, conforme apresentado na seção 2.3 do Artigo 1 desta tese, era superior àquela observada no dreno convencional.

Em contraste, tubos de drenagem com área para passagem de água maiores tendem a apresentar uma maior capacidade de descarga, visto que há uma menor resistência para o movimento da água do meio poroso para o dreno (Ghane, 2022b), corroborando com os resultados apresentados para os drenos convencionais na Tabela 2.8. Contudo, diferentemente do apontando na Tabela 2.3 do Artigo 1 desta tese, as vazões médias obtidas pelo sistema com dreno convencional com envoltório foram superiores às obtidas para o dreno convencional sem envoltório, exceto para o meio poroso arenoso, onde a descarga obtida para o sistema sem envoltório foi maior. Portanto, devido ao alto teor de sólidos carregados nesse meio poroso (Tabela 2.8) e a alta fração de partículas finas presentes (Figura 2.9), infere-se, mais uma vez, que houve a colmatação do material envoltório, o que restringiu a entrada da água, aumentando a perda de carga e reduzindo a taxa de descarga do sistema.

De acordo com a granulometria dos meios porosos estudados (Figura 2.9) e as especificações da USCE (1955), para o meio poroso arenoso, a largura máxima dos orifícios deve ser de 0,48 mm para geometrias mais alongadas e 0,40 mm para orifícios com geometria mais arredondadas. Para o meio poroso de textura franca, os limites são 0,84 mm para orifícios alongados e 0,70 mm para orifícios arredondados, enquanto no caulim, os valores são 0,19 mm e 0,16 mm, respectivamente. Segundo a USBR (1973), os limites máximos recomendados são 0,79 mm para meio poroso arenoso, 1,40 mm para o meio poroso franco e 0,32 mm para o caulim. Por sua vez, a norma DIN (4095), que é menos restritiva, sugere larguras máximas de 1,19 mm para o meio poroso arenoso, 2,10 mm para o meio poroso franco e 0,48 mm para o caulim.

Conforme apresentado na Tabela 2.1 do Artigo 1, a largura média dos orifícios dos drenos KC, que possuem geometria mais alongada, é de 0,19 mm, enquanto os orifícios dos drenos convencionais, com geometria mais arredondada, têm uma largura média de 1,64 mm. Assim, os orifícios do dreno *knife-cut* estão em conformidade com as três normas de dimensionando mencionadas para uso nos três tipos de meios porosos e infere-se, portanto, que esse dreno se mostra apto quanto à sua capacidade de drenagem e de restrição de sólidos. Além

disso, a semelhança estatística e a proximidade entre as médias de sólidos carregados totais obtidos para este sistema drenante e o sistema drenante convencional com envoltório (Tabela 2.8) reforçam o bom desempenho do dreno KC em limitar a entrada de sólidos. Isso porque, teoricamente, drenos com envoltório são utilizados justamente para limitar a entrada de sólidos no sistema, sendo essa uma de suas principais funções em drenagem subterrânea (Byrne *et al.*, 2023a; Ghane, 2022b; Yang *et al.*, 2023). Assim, os resultados sugerem que o dreno KC, mesmo sem envoltório, é capaz de atingir uma funcionalidade semelhante, controlando de forma eficaz a mobilização e transporte de partículas sólidas. Ghane (2022b) comenta que, embora haja a entrada de alguns sólidos tanto no dreno com envoltório quanto no dreno do tipo *knife-cut*, sendo ligeiramente maior neste último, ambos demonstram eficácia na função de retenção de partículas sólidas, inclusive em longo prazo.

Em contrapartida, a largura média dos orifícios do dreno convencional atendeu apenas os requisitos da DIN 4095 para o meio poroso de textura franca, que é a norma menos restritiva. Portanto, como a largura média dos orifícios convencionais eram maiores que o recomendado para os demais tipos de meio poroso e normas, esperava-se um maior carregamento de sólidos nesses tratamentos, que, por esse motivo, deveriam se diferenciar estatisticamente do sistema drenante CM. No entanto, esse comportamento foi observado somente para o meio poroso arenoso (Tabela 2.8), o mais suscetível à erosão hídrica entre os meios porosos estudados (Tabela 2.6). Nos meios porosos de textura franca e, principalmente, o caulim, onde os orifícios do dreno convencional não se adequaram a norma alguma, o transporte de sólidos não foi significativamente maior. Isso sugere que a drenagem e o carregamento de sólidos são processos complexos, que envolvem outros fatores além da geometria dos orifícios e a granulometria do meio poroso. Uma possível explicação para esses resultados é que as forças coesivas dos meios porosos de textura franca e o caulim foram suficientes para resistirem às erosivas, evitando a mobilização de partículas. Outra hipótese é pode ter ocorrido o aglomeramento das partículas do meio poroso, formando uma estrutura estável sobre os orifícios do dreno, que teria atuado como uma barreira natural, limitando a entrada de partículas sólidas nos sistemas. Contudo, em condições de fluxo mais intenso, as forças erosivas tornam-se maiores, podendo desestabilizar tanto as forças coesivas dos meios porosos quanto as estruturas estáveis possivelmente formadas sobre os orifícios.

Adicionalmente, os valores de sólidos carregados totais em todos os sistemas drenantes ficaram abaixo do limite de 30% a 50% do material poroso total, conforme apresentado na NBR 12212 (ABNT, 1992), evidenciando a capacidade de retenção de partículas e o atendimento aos requisitos da norma para os drenos. Contudo, a capacidade de retenção observada para o sistema

drenante SM pode ter sido influenciado pelo curto tempo de observação, já que seus orifícios, de formato convencional, com maior área de passagem, levam a uma maior velocidade de escoamento. Isso pode resultar em erosão hídrica, dificultar a formação de uma estrutura estável de sólidos na imediação dos orifícios e facilitar a passagem de partículas sólidas ao longo do tempo, especialmente em solos de baixa coesão.

Portanto, considerando a complexidade da drenagem e o fato de que os orifícios dos drenos convencionais atenderam apenas à norma menos restritiva para um único meio poroso, a utilização desse tubo de drenagem sem envoltório apresenta incertezas quanto à sua capacidade de controle de sólidos, o que pode comprometer o desempenho a longo prazo do sistema. Em contrapartida, para o dreno KC, as baixas taxas de drenagem observadas e a pequena área de abertura de seus orifícios indicam que um aumento expressivo do fluxo de entrada da água não ocorreria, limitando a mobilização de partículas sólidas e reforçando sua capacidade de limitar a entrada de partículas, mesmo em condições mais severas.

O resumo da análise de variância (ANOVA) realizada para a avaliação da descarga parcial e sólidos carregados parciais dos drenos estudados em função dos tratamentos aplicados e do tempo está apresentado na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Resumo da ANOVA realizada na avaliação da descarga parcial e sólidos carregados parciais dos drenos estudados em função do tempo e dos tratamentos aplicados.

Fonte de variação	GL	QM	
		Descarga total	Sólidos carregados totais
Solo	2	1,591548**	370,392009**
SD	2	0,019683**	369,883891**
T	27	0,276480**	124,945657**
Solo x SD	4	0,005379**	369,209416**
Solo x T	54	0,244395**	124,625168**
SD x T	54	0,017029**	124,600699**
Solo x SD x T	108	0,016015**	124,477913**
Erro	504	0,000080	0,828623
Total corrigido	755	-	-
CV (%)	-	16,09	129,27

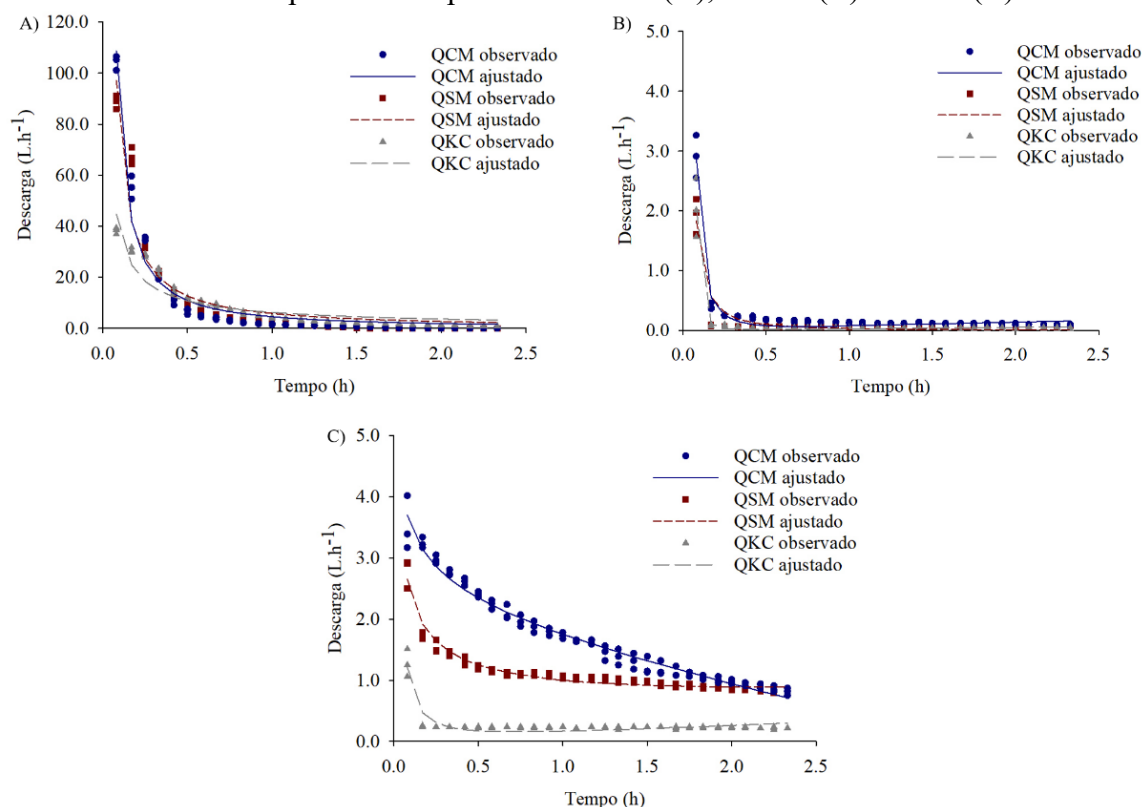
Legenda: **: significativo ao teste F a 1% de probabilidade estatística. MP: meio poroso. SD: sistema drenante. T: tempo. GL: grau de liberdade. QM: quadrados médios. CV: coeficiente de variação.

Fonte: do autor (2025).

Os efeitos significativos dos tratamentos, tanto em relação aos seus efeitos isolados quanto às suas interações (Tabela 2.9), evidenciam, mais uma vez, que meios porosos com características distintas, combinados ou não a diferentes sistemas drenantes, resultam em capacidades distintas de descarga e de transporte de sólidos. O efeito simples, duplo e triplo do fator tempo sobre as variáveis estudadas, reforça a complexidade do processo de drenagem subterrânea, indicando que esse fenômeno não depende apenas das propriedades intrínsecas do meio poroso e do sistema drenante, mas também de como essas características interagem ao longo do tempo. Têm-se um comportamento da drenagem é altamente dinâmico e temporal, sendo influenciado por uma combinação de fatores interdependentes que atuam de forma simultânea, como a heterogeneidade dos meios porosos e dos sistemas drenantes.

Na Figura 2.11 pode ser visto o efeito do desdobramento de tempo dentro de cada nível de meio poroso e sistema drenante. Para todos os tipos de meios porosos, a estimativa desse efeito foi melhor representada por uma equação exponencial. Os expoentes negativos indicam que a taxa de descarga diminui com o tempo, à medida que o teor de água no meio poroso se reduz. Expoentes com valores absolutos maiores sugerem que a taxa inicial de descarga é alta, mas decresce abruptamente ao longo do tempo, indicando a alta sensibilidade desses sistemas de drenagem à perda de pressão hidráulica (Farley; Trow, 2015; Greyvenstein; van Zyl, 2007). A influência da carga hidráulica sobre a descarga pode ser verificada experimentalmente, por meio das leituras nos piezômetros e respectivas vazões drenadas, e constatou-se, para todos os tratamentos, que, de fato, as taxas de descargas diminuía conforme o processo de drenagem ocorria e a umidade do meio poroso e carga hidráulica do sistema se reduziam.

Figura 2.11 - Efeito do desdobramento de tempo dentro de cada nível de meio poroso e sistema drenante para o meio poroso arenoso (A), caulim (B) e franco (C).



Equações de ajuste para A: $CM = 4,5438x^{-1,2574}$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 96,56%; $SM = 5,8156x^{-1,1149}$, com R^2 igual a 91,52%; e $KC = 6,2471x^{-0,7803}$, com R^2 igual a 87,47%, Equações de ajuste para B: $CM = 0,0104x^{-2,2266} + 0,0677x$, com R^2 igual a 97,37%; $SM = 0,0338x^{-1,5802}$, com R^2 igual a 88,10%; e $KC = 9,5527,10^{-5}x^{-3,9464} + 0,0272x$, com R^2 igual a 95,44%, Equações de Ajuste para C: $CM = 2,2775x^{-0,1964} - 0,5226x$, com R^2 igual a 97,54%; $SM = 0,8816x^{-0,4336} + 0,1198x$, com R^2 igual a 95,70%; e $KC = 0,0457x^{-1,2957} + 0,1214x$, com R^2 igual a 85,13%.

Fonte: do autor (2025).

Ao analisar a Figura 2.11, observou-se que as maiores taxas de descarga inicial foram obtidas no meio poroso arenoso, que apresentou um padrão característico de drenagem acelerada nos instantes iniciais, seguido por uma redução abrupta e posterior estabilização. Esse comportamento é atribuído às características intrínsecas desse meio poroso, como a alta permeabilidade e condutividade hidráulica quando saturado, além da baixa coesão e capacidade de retenção de água (Saygin *et al.*, 2021; Khanh; Pramanik; Ngoc, 2024; Ma *et al.*, 2024; Ravindran; Gratchev, 2022), que permitem que a água livre presente nos macroporos do meio poroso seja drenada rapidamente devido à ação gravitacional. No entanto, à medida que a água livre é drenada e a umidade do meio poroso se aproxima da capacidade de campo, a drenagem é reduzida drasticamente. Nesse ponto, a água no meio poroso é retida principalmente pelos microporos, onde as forças capilares se sobressaem e a drenagem gravitacional não é mais passível de acontecer (Bharat; Gapak, 2021; Bovi *et al.*, 2022; Luo *et al.*, 2022). A partir desse

momento, que para este meio poroso infere-se que tenha acontecido aproximadamente 30 minutos após o início do experimento, a taxa de descarga sofre uma desaceleração, até cessar completamente.

O caulim apresentou o processo de drenagem mais lento entre os três meios porosos, com as menores taxas iniciais de descarga e uma queda abrupta logo nos primeiros 15 minutos após o início do processo de drenagem (Figura 2.11b). Esse comportamento é típico de meios porosos que apresentam um rápido esgotamento da água livre devido a maior presença de microporos, que requerem um maior esforço para a abstração da água (Bharat; Gapak, 2021; Bovi *et al.*, 2022; Saygin *et al.*, 2021; Khanh; Pramanik; Ngoc, 2024; Luo *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2024; Ravindran; Gratchev, 2022).

Por outro lado, o meio poroso de textura franca apresentou taxas de descarga iniciais superiores às do caulim, mas inferiores às do arenoso (Figura 2.11c). Infere-se que o maior teor de areia desse meio poroso tenha contribuído para a maior taxa de descarga inicial, enquanto os teores de silte e argila tenham retardado o processo em relação ao meio poroso arenoso. Além disso, notou-se que a redução das taxas de descarga ocorreu de forma progressiva, sem quedas abruptas, como observado nos outros dois meios porosos. Esse comportamento provavelmente se deve à distribuição granulométrica mais equilibrada do solo franco (Figura 2.9), que proporciona uma transição mais suave entre macro e microporos, o que favorece um escoamento mais estável e contínuo, sem grandes variações nas taxas de drenagem ao longo do tempo (Bharat; Gapak, 2021; Bovi *et al.*, 2022; Saygin *et al.*, 2021; Khanh; Pramanik; Ngoc, 2024; Luo *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2024; Ravindran; Gratchev, 2022).

Ressalta-se que apesar do sistema drenante com dreno *knife-cut* ter apresentado as menores descargas iniciais em todos os meios porosos, ele destaca-se por permitir uma redução gradual e controlada das taxas de descarga ao longo do tempo, de forma a manter um fluxo mais estável, o que pode ser benéfico em termos de drenagem prolongada e manutenção da estrutura do meio poroso.

Ghane (2022a) simulou os custos iniciais, que incluem o preço de aquisição e instalação dos materiais, em projetos de drenagem subterrânea com drenos convencionais com envoltório e com sistemas que utilizam drenos do tipo KC. A menor resistência de entrada nos drenos com envoltório resultou em um raio efetivo expressivamente maior em comparação ao sistema com drenos KC, o que, por sua vez, resultou em uma maior taxa de influxo nesses sistemas. Isso permitiu que o espaçamento ideal entre os drenos com envoltório fosse maior, o que reduziu o comprimento lateral total de tubos necessários em comparação aos drenos *knife-cut*. No entanto, mesmo sob essas condições, quando a simulação de funcionamento de ambos os sistemas foi

realizada para admitirem a mesma taxa de drenagem e profundidade de instalação, os drenos com orifícios *knife-cut* apresentaram um custo inicial \$0,59 por metro, inferior ao dos drenos convencionais com envoltório. Isso representou uma economia de aproximadamente 16% em comparação com os drenos convencionais com envoltório. O autor destacou que, para uma mesma profundidade e diâmetro do tubo, os custos de instalação foram equivalentes; a diferença do custo inicial dos sistemas aconteceu devido ao preço unitário do dreno convencional e do envoltório, que foram expressivamente superiores ao do dreno KC. Portanto, embora os drenos KC exijam uma maior quantidade de tubos laterais para drenarem a mesma descarga, esses sistemas mostram-se economicamente viáveis.

Além disso, a instalação de sistemas de drenagem pode ser otimizada com o uso de máquinas projetadas para realizar o processo de maneira mais rápida e eficiente (Yannopoulos *et al.*, 2020). Essas máquinas são projetadas para abrir valas enquanto instalam os drenos, de forma simultânea, no meio poroso. No entanto, a instalação de drenos com envoltório é geralmente mais complexa e envolve etapas adicionais, uma vez que a máquina precisa acomodar e proteger o envoltório durante a sua colocação (Stuyt; Willardson, 1999; Vlotman; Willardson; Dierickx, 2001). Além disso, a pressão aplicada pelo próprio maquinário durante a operação pode comprometer a integridade do envoltório, especialmente se o solo contiver pedras, raízes ou outros detritos que possam perfurar o material. A alta velocidade de operação das máquinas também aumenta os riscos de danos ao envoltório. Por isso, é essencial que as máquinas sejam devidamente ajustadas de acordo com o tipo de dreno e envoltório a ser utilizado, e que os operadores sejam treinados, para minimizar esses riscos. Nesse sentido, a instalação direta de drenos sem envoltório simplifica esse processo, já que somente o dreno precisa ser introduzido ao solo. Isso pode reduzir a mão de obra necessária, o tempo de instalação os custos associados. Ademais, a ausência do envoltório reduz a geração de resíduos associados ao transporte e descarte, o que contribui para a redução dos impactos ambientais. Assim, o uso de drenos sem envoltório não só simplifica e acelera o seu processo de instalação, mas também contribui com a sustentabilidade ao minimizar o consumo de recursos e a produção de resíduos.

Por fim, Ghane (2022b) comenta que nem o melhor envoltório ou tubo de drenagem pode operar bem sob condições inadequadas de instalação. As condições ideais ocorrem quando o solo está seco e o nível do lençol freático baixo. Assim, sempre que possível, deve-se evitar a instalação ou qualquer outro trabalho de campo durante períodos de alta umidade, pois isso pode causar a compactação do solo e dificultar a infiltração e percolação da água. Ressalta-se que durante a instalação dos drenos, o solo ao redor é perturbado, o que pode resultar em maior

mobilização e transporte de partículas sólidas até que o solo se estabilize após a instalação. Além disso, o autor ressalta que caso os drenos KC fiquem expostos por muito tempo ao sol, seus orifícios podem se esticar durante sua instalação, aumentando a área de abertura para a passagem da água e comprometendo sua proteção contra a sedimentação. Por fim, em áreas com texturas de solo argiloso e arenoso, onde há problemas de sedimentação do solo arenoso, o autor menciona que alterar entre drenos com envoltório e drenos do tipo KC ao longo de distâncias curtas é inviável; a solução, nesse caso, seria utilizar drenos KC em toda a extensão do campo, desde que verificado seu desempenho.

2.2.4 CONCLUSÃO

As características dos meios porosos influenciam diretamente o desempenho dos sistemas de drenagem subterrânea. Meios de textura fina, como o franco e o caulim, oferecem maior resistência à erosão hídrica e menor suscetibilidade ao transporte de sólidos, mas podem retardar ou até interromper a drenagem. Por outro lado, meios de textura mais grossa, como os arenosos, favorecem o escoamento da água, mas são mais vulneráveis à erosão e ao transporte de sólidos, comprometendo o desempenho e a durabilidade do sistema.

As dimensões dos orifícios nos drenos afetam o desempenho dos sistemas de drenagem subterrânea. Orifícios maiores resultam em taxas de descarga mais elevadas, mas aumentam o transporte de sólidos para o interior dos drenos. O uso de material envoltório é eficaz para facilitar o influxo de água e restringir o carreamento de sólidos. No entanto, em meios porosos de baixa coesão, as partículas podem se mobilizar, ocasionando a colmatação e reduzindo a permeabilidade e a taxa de descarga do sistema.

O sistema drenante com orifícios tipo *knife-cut* apresentou menores descargas, mas garantiu um fluxo mais estável ao longo do tempo. As taxas de carreamento de sólidos foram semelhantes às dos drenos convencionais com envoltório, comprovando o seu desempenho. O uso de drenos *knife-cut* mostra-se promissor para drenagem subterrânea, oferecendo benefícios como redução de custos, menor geração de resíduos associados ao transporte e descarte de envoltórios, além da otimização do processo de instalação. No entanto, é recomendado a realização de estudos de maior duração para assegurar maior confiabilidade e precisão nos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABDULJALEEL, Yasir *et al.* Assessment of Subsurface Drainage Strategies Using DRAINMOD Model for Sustainable Agriculture: A Review. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1355, 2023.
- ALAVI, Seyed Abdollah *et al.* Performance evaluation of the Hydroluis drainpipe-envelope system in a saline-sodic soil. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106486, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 21212**: Projeto de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459**: Solo - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7180**: Solo - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
- BAHÇECI, Idris *et al.* A new drainpipe-envelope concept for subsurface drainage systems in irrigated agriculture. **Irrigation and Drainage**, v. 67, n. May, p. 40–50, 2018.
- BARBOSA, José Carlos; MALDONADO JUNIOR, Walter. **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2015.
- BHARAT, Tadikonda Venkata; GAPAK, Yagom. Soil-water characteristic curves of bentonites in isochoric conditions during wetting: measurement and prediction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 58, n. 5, p. 711–721, 2021.
- BOVI, Renata Cristina *et al.* Effect of hydrophysical properties on pipe formation in tropical soils. **Science of The Total Environment**, v. 827, p. 154296, 2022.
- BROUGHTON, Robert Stephen; CHIRARA, K; BONNELL, R B. **Tests of drain tubes with pin holes and small slots**. Chicago, USA: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) - of drain tubes with pin holes and small slots. Proceedings of the 5th National Drainage Symposium, 1987.
- BYRNE, Ian *et al.* Assessment of the hydraulic and filter performance of different drainage stone aggregates to elucidate an optimum size range for use in clay-textured soils. **Agricultural Water Management**, v. 278, n. 31, p. 108164, 2023a.
- BYRNE, Ian *et al.* Investigating the suitability of synthetic envelopes as an alternative or complement to stone aggregate in clay-textured soils in Ireland. **Geoderma Regional**, v. 32, p. e00598, 2023b.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos Editora S.A., 1975. v. 1

CHAVARRÍA-VIDAL, Adián Enrique; MIRANDA, Jarbas Honorio de; FARIAS-RAMÍREZ, Asdrubal. Construcción de una mesa de succión de doble capa de bajo costo para definir macroporosidad (porosidad drenable) y microporosidad Construction of a low-cost suction table to define macroporosity (drainable porosity) and microporosity. **Tecnología en Marcha**, v. 33, n. 3, p. 90–97, 2020.

DIN 4095. **Planning design and installation of drainage systems protecting structures against water in ground**. Deutsches Institut für Normung, 1990.

ELNASHAR, Walaa *et al.* Value Engineering Approach to Evaluate the Agricultural Drainage Water Management Strategies. **Water**, v. 15, n. 4, p. 831, 2023.

FARLEY, Malcolm; TROW, Stuart. Losses in Water Distribution Networks: A Practitioners' Guide to Assessment, Monitoring and Control. **Water Intelligence Online**, v. 4, n. 0, p. 9781780402642–9781780402642, 2015.

FENG, Xuemao; TENG, Jidong; WANG, Hongwei. Influence Mechanism of Water Content and Compaction Degree on Shear Strength of Red Clay with High Liquid Limit. **Materials**, v. 17, n. 1, p. 162, 2023.

FERREIRA, Paulo Vanderlei. **Estatística experimental aplicada à agronomia**. Maceió: EDUFAL, 1991.

GABR, Mohamed Elsayed; FATTOUH, Ehab; ELTARABILY, Mohamed Galal. Design of subsurface drainage network with minimum overall cost using Lagrange multiplier optimization. **Irrigation and Drainage**, v. 73, n. 2, p. 613–626, 2024.

GAJ, Naresh; MADRAMOOTOO, Chandra A. Effects of Perforation Geometry on Pipe Drainage in Agricultural Lands. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, n. 7, p. 04020015, 2020.

GHANE, Ehsan. Choice of pipe material influences drain spacing and system cost in subsurface drainage design. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 38, n. 4, p. 685–695, 2022a.

GHANE, Ehsan. Choosing between sock-wrapped and sand-slot pipes. **Michigan State Univesity**, 2022b.

GHANE, Ehsan. Drain Sedimentation Tool. **Michigan State Univesity**, v. E3455, 2022c.

GHANE, Ehsan *et al.* Knitted-sock geotextile envelopes increase drain inflow in subsurface drainage. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107939, 2022.

GREYVENSTEIN, B.; VAN ZYL, Jakobus Ernst. An experimental investigation into the pressure - leakage relationship of some failed water pipes. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 56, n. 2, p. 117–124, 2007.

KANNAZAROVA, Zulfiya *et al.* Drainage in irrigated agriculture: Bibliometric analysis for the period of 2017–2021. **Agricultural Water Management**, v. 305, p. 109118, 2024.

KAUR, Harpreet *et al.* Drainage water management impacts soil properties in floodplain soils in the midwestern, USA. **Agricultural Water Management**, v. 279, p. 108193, 2023.

KHANH, Phan Truong; PRAMANIK, Sabyasachi; NGOC, Tran Thi Hong. Soil Permeability of Sandy Loam and Clay Loam Soil in the Paddy Fields in An Giang Province in Vietnam. **Environmental Challenges**, v. 15, 2024.

LI, Yufang *et al.* Influence of soil texture on the process of subsurface drainage in saturated-unsaturated zones. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 14, n. 1, p. 82–89, 2021.

LI, Hang *et al.* Microstructural characteristics and prediction of hydraulic properties of geotextile envelopes via image analysis and pore network modeling. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 53, n. 1, p. 106–120, 2025.

LUO, Shengmin *et al.* Soil water potential: A historical perspective and recent breakthroughs. **Vadose Zone Journal**, v. 21, n. 4, 2022.

MA, Zhiyuan *et al.* Characteristics of soil salinity and water-salt transport in the vadose zone of salt-impacted regions with variable permeability. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 46, n. 11, p. 442, 2024.

MOHAMED, Hassan I.; ABOUZEID, Gamal A. A. Flow Behavior Around Perforated Tile Drainage Pipes. *In*: NINTH INTERNATIONAL WATER TECHNOLOGY CONFERENCE. Egypt: Mansoura University, 2005. p. 1117–1129.

MOUSSA, Malak *et al.* Micro- and macrostructure changes of soil under irrigation with electromagnetically treated water. **Soil and Tillage Research**, v. 203, p. 104690, 2020.

O'KELLY, Brendan C. Theory of liquid and plastic limits for fine soils, methods of determination and outlook. **Geotechnical Research**, v. 11, n. 1, p. 43–61, 2024.

PHOGAT, Vinod *et al.* Plant-available water capacity of soils at a regional scale: Analysis of fixed and dynamic field capacities. **Pedosphere**, v. 34, n. 3, p. 590–605, 2024.

PIMENTEL-GOMES, Frederico. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: Fealq, 2022.

RAVINDRAN, Sinnappoo; GRATCHEV, Ivan. Effect of Water Content on Apparent Cohesion of Soils from Landslide Sites. **Geotechnics**, v. 2, n. 2, p. 385–394, 2022.

RITZEMA, Henk P. **Drainage Principles and Applications**. 3. ed. Wageningen: ILRI Publication, 2006.

SAYGIN, Selen Deviren *et al.* Analysis of soil cohesion by fluidized bed methodology using integrable differential pressure sensors for a wide range of soil textures. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 191, p. 106525, 2021.

STUYT, Louis C. P. M.; DIERICKX, Willy. Design and performance of materials for subsurface drainage systems in agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 86, p. 50–59, 2006.

STUYT, Louis C. P. M.; WILLARDSON, L. S. Drain envelopes. *In*: SKAGGS, R. W.; SCHILFGAARDE, J. van (eds.). **Agricultural Drainage**. Madison, Usa: American Society of Agronomy, 1999. V. 38, P. 927–962.

TAKESHIMA, Ryoma *et al.* Subsurface drainage and raised-bed planting reduce excess water stress and increase yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). **Field Crops Research**, v. 297, p. 108935, 2023.

TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília-DF: Embrapa solos, 2017.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; SILVEIRA, André Luiz Lopes. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

USBR. **Design of small dams**. 2 nd ed. Washington: United States government printing office, 1973.

USCE. Subsurface drainage facilities for air-fields. *In*: DRAINAGE EROSION CONTROL. Washington: military construction, 1955.

VALIPOUR, Mohammad *et al.* The evolution of agricultural drainage from the earliest times to the present. **Sustainability**, v. 12, n. 416, 2020.

VLOTMAN, Willem F.; SMEDEMA, Lambert K.; RYCROFT, David W. **Modern Land Drainage**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2020.

VLOTMAN, Willem F; WILLARDSON, L. S.; DIERICKX, W. **Envelope design for subsurface drains**. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 2001.

YANG, Haoyu *et al.* Effects of geotextile envelope and perforations on the performance of corrugated drain pipes. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 16, n. 1, p. 36–44, 2023.

YANNOPOULOS, Stavros I. *et al.* Evolution of the materials and methods used for subsurface drainage of agricultural lands from antiquity to the present. **Water**, v. 12, p. 1767, 2020.

YU, Kun *et al.* Using micro focus industrial computed tomography to characterize the effects of soil type and soil depth on soil pore characteristics, morphology, and soil compression in Xi'an, China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, n. 4, p. 1943–1959, 2020.

3 TERCEIRA PARTE – CONSIDERAÇÕES FINAIS

3.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O dreno convencional, com orifícios maiores e mais arredondados, apresentou maior capacidade de admissão de água, resultando nos maiores valores de vazão drenada, seguido pelo dreno com manta (CM) e, por último, pelo dreno *knife-cut* (KC), que possui orifícios menores e mais alongados. No entanto, embora os drenos com orifícios maiores favoreçam uma maior taxa de descarga, também aumentam o risco de obstrução e sedimentação do sistema, devido à maior probabilidade de mobilização e transporte de partículas sólidas.

Além disso, as propriedades dos meios porosos impactam diretamente o desempenho da drenagem subterrânea. Solos de textura fina, como franco e caulim, apresentam maior coesão e resistência à erosão, mas dificultam o processo de drenagem do solo devido à alta capacidade retenção de água. Em contrapartida, meios porosos de textura mais grossa, como os arenosos, favorecem o processo de drenagem, mas são mais vulneráveis à mobilização e carreamento de partículas. O uso de envoltório facilita o influxo da água do solo para o dreno, mas seu desempenho pode ser comprometido pelo fenômeno da colmatção, especialmente em solos de baixa coesão.

Por fim, ressalta-se que, embora o dreno *knife-cut* apresente menor capacidade de descarga, ele se destaca por possibilitar um fluxo mais controlado e estável ao longo do tempo, o que favorece a drenagem prolongada e a preservação dos meios porosos. Além disso, as taxas de carreamento de sólidos foram comparáveis às observadas nos drenos convencionais com envoltório. Dessa forma, os drenos *knife-cut* se apresentam como uma alternativa promissora para drenagem subterrânea, oferecendo vantagens em termos de redução de custos e diminuição de resíduos associados à fabricação, transporte e descarte de materiais envoltórios. Contudo, sugere-se que sejam realizados estudos de longa duração para avaliar seu desempenho em diferentes condições de solo e carga hidráulica.