



**INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA**  
**DIVISÃO DE AGRICULTURA**  
**CURSO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA AGRÍCOLA E ÁGUA RURAL**

Monografia científica apresentada como requisito para obtenção do grau de licenciatura em  
Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural

**Tema:**

**Estudo comparativo de equações relevantes a drenagem agrícola no  
contexto de solos agrícolas do Sistema de Regadio de Chókwè**

**Autor:** Pacheco Aurélio Tivane

**Tutor:** Doutor Lateiro Salvador de Sousa, PhD

Lionde, outubro de 2023



## Estudo comparativo de equações relevantes a drenagem agrícola no contexto de solos agrícolas do Sistema de Regadio de Chókwè

Monografia de Investigação Científica sobre Estudo comparativo de equações relevantes a drenagem agrícola no contexto de solos agrícolas do Sistema de Regadio de Chókwè, apresentado ao curso de Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural, na Divisão de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural

**Autor:** Pacheco Aurélio Tivane

**Tutor:** Doutor Lateiro Salvador de Sousa, PhD



## INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

### Declaração

Declaro por minha honra que este Trabalho de Culminação do Curso é resultado da minha investigação pessoal e das orientações do(s) meu tutor, o seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto, nas notas e na bibliografia final. Declaro ainda que este trabalho não foi apresentado em nenhuma outra instituição para propósito semelhante ou obtenção de qualquer grau académico.

Lionde, 16 de Novembro de 2023

(Pacheco Aurélio Tivane)

Pacheco Aurélio Tivane  
(Assinatura do estudante)

**Tutor:** Doutor Lateiro Salvador de Sousa, (PhD)

Lionde, Novembro de 2023



Estudo comparativo de equações relevantes a drenagem agrícola no contexto de solos agrícolas do Sistema de Regadio de Chókwè

Monografia científica apresentada  
como requisito para obtenção do grau de  
licenciatura em Engenharia Hidráulica  
Agrícola e Água Rural

Aprovado em 17 / 10 / 2023

BANCA EXAMINADORA

(Prof. Doutor Lateiro Salvador de Sousa, PhD)

(Eng. Salimo Henrique Muchecua, MSc)

(Eng. Philipa Nomagugu Ncube, MSc)

## ÍNDICE

Índice de Figuras.....	iii
Índice de Tabelas .....	iii
Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vi
Abstract.....	vii
1.1. Objetivos:.....	3
1.1.1. Geral.....	3
1.1.2. Específicos.....	3
1.2. Problema e Justificativa .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1. Drenagem agrícola.....	4
2.2. Taxa de descarga ou coeficiente de descarga .....	5
2.3. Condutividade hidráulica.....	5
2.4. Carga hidráulica.....	7
2.5. Porosidade drenável.....	7
2.6. Espaçamento entre drenos .....	9
2.6.1. Equações do regime permanente .....	9
2.6.2. Equações do regime não permanente.....	13
2.7. Avaliação do desempenho das equações .....	17
3. METODOLOGIA.....	19
3.1. Área do estudo .....	19
3.1.1. Solos e Clima.....	19
3.2. Procedimentos.....	20
3.2.1. Local da coleta:.....	21
3.2.2. No laboratório .....	22
3.3. Parâmetros hidráulicos.....	22
3.3.1. Regime permanente .....	23
3.3.1. Regime não permanente.....	23
3.4. Avaliação do desempenho de equações de drenagem agrícola. ....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1. Parâmetros hidráulicos dos solos .....	25
4.2. Avaliação das equações .....	27

4.2.1. Regime não permanente.....	27
4.2.2. Regime Permanente .....	35
5. CONCLUSÃO .....	37
6. REFERENCIAS.....	39
7. ANEXOS .....	I
7.2. Ensaio registo de dados; .....	II

## Índice de Figuras

Figura 1; Desenho mostrando parâmetros utilizados no Equação de Donnan.....	11
Figura 2; Desenho mostrando parâmetros utilizados na Equação de Hooghoudt .....	12
Figura 3: Esquema de parâmetros para o modelo de Ernest.....	13
Figura 4: Esquema de parâmetros para o modelo de Glover-Dumm.....	16
Figura 5: Esquema de parâmetros para o modelo de Boussinesq-Glover .....	17
Figura 6: Mapa de distrito de chókwe; .....	19
Figura 7: Unidade de estudo hidrológico reduzida.....	20
Figura 8: Ensaio e registo de dados: .....	21
Figura 9: Coletas de amostras dos solos: A-Matuba; B-Lionde 1; C-Lionde 2; D-Xilembene .....	22
Figura 10: Variação da altura do lençol freático nas equações não permanente em solos de Matuba .....	29
Figura 11: Variação da altura do lençol freático nas equações não permanente em solos de Lionde .....	30
Figura 12: Variação da altura do lençol freático nas equações não permanente em solos de Xilembene.....	31
Figura 13: Gráfico de análise de desvio quadrado médio das equações não permanentes...31	

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Classificação das Condutividade Hidráulicas.....	6
Tabela 2: Equações de drenagem agrícola no fluxo permanente.....	10
Tabela 3: Equações de drenagem agrícola no fluxo não permanente .....	14
Tabela 4: Ordem crescente da eficiência das equações no fluxo não permanente. ....	32
Tabela 5: Teste de Tukey para comparação de médias para o espaçamento entre drenos predito pelos modelos avaliados. ....	35
Tabela 6: Regularização de furos de gotejadores no Tubo .....	I
Tabela 7: Variação de altura de lençol freático nos solos de Matuba.....	II
Tabela 8: Espaçamento entre os drenos nos solos de Matuba .....	III
Tabela 9: Variação de altura de lençol freático nos solos de Lionde.....	III
Tabela 10: Espaçamento entre os drenos nos solos de Lionde .....	III
Tabela 11: Variação de altura de lençol freático nos solos de Xilembene .....	IV
Tabela 12: Espaçamento entre os drenos nos solos de Xilembene.....	IV

### **Lista de símbolos e abreviaturas.**

**A** - Área da secção transversal ( $\text{cm}^2$ )

**D**: Altura da camada impermeável até a linha dos drenos (m);

**h** - Carga hidráulica (cm)

**h**: Altura do lençol freático sobre o plano localizado na linha dos drenos na posição intermediária entre eles (m);

**ho**: Altura inicial do lençol freático sobre o plano localizado na linha dos drenos na posição de seu semi-espçamento (m);

**ht**: Altura do lençol freático sobre o plano localizado na linha dos drenos na posição de seu semi-espçamento, após o rebaixamento (m);

$K_0$ : Condutividade hidráulica do solo (m/dia-1);

**L**: Espaçamento entre os drenos (m);

**L** – Altura de a areia (cm);

**q**: Recarga da unidade hidrológica (m/dia1);

**PM**: Perímetro molhado (m);

**SRC**- Solos do Regadio de Chókwè

**t**- Tempo de descarga (min)

t: tempo (dias);

**V** – Volume descarrega ( $\text{cm}^3$ );

$\Sigma$  - Somatório

$\pi$  – Valor PI

**r**: raio do dreno (m).

**$\mu$** : Porosidade drenável (adimensional);

$\mu$  é a porosidade drenável em  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;

$\theta_s$ - Umidade de saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_{cc}$  é a umidade, base volume, na capacidade de campo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me erguer tanta força, dedicação e saúde em todo o percurso dos estudos, e por ter cuidado de algumas pessoas próximas que contribuíram de forma direta ou indiretamente nesta jornada. Em seguida Agradeço os meus pais Aurélio Pacheco Tivane e Lídia Stefan Mucavel, pelo financiamento, contribuições psicológicas, e tudo o que sou hoje graças a eles, apesar de que o poder de expressar esse agradecimento à minha mãe já não tenho devido os seus dias de vida que esgotaram antes de atingir esta etapa, suas contribuições foram imensas e formam minha estrutura pessoal, que descanse em paz.

Em seguida agradeço aos meus irmãos, Santos, Amaral e Narciso por acreditarem em mim, e pelos valores monetários e morais por eles disponibilizados. Do ponto de vista científico, agradeço a todos docentes que elucidaram me na área científica para o desenvolvimento deste projeto, especificamente o Engenheiro Lateiro Salvador de Sousa PhD por todo o trabalho feito que tornou possível a realização deste trabalho. Também o Olof Pedro Nhambomgo suas contribuições foram cruciais neste projeto. Em seguida agradeço aos meus Amigos e colegas, Válder Cavele, António Nhanala, Ferdinaldo Tivane, Declio Tsenane, Dulce Macuacua, Mussa Delivane, Obed Simbine, entre outros não mencionados suas contribuições são reconhecidas.

## **Resumo**

Grande parte de áreas agrícolas, localizam-se em zonas com dificuldades de drenagem, classificadas por baixas produções, onde demanda de drenagem nestas áreas justifica-se por aplicação excessiva de lâminas de água, ocasionando a elevação do lençol freático e acúmulo de sais na camada de solo, explorado pelo sistema radicular das culturas, necessitando de um sistema de drenagem. O presente estudo objetiva-se em avaliar as equações de drenagem agrícola nos solos do regadio de chókwe, de modo a observar a eficiência das equações na remoção do excesso de água nas condições de fluxo permanente e não permanente, onde coletou-se três amostras do solo há 30 cm de profundidade, simulados 5 vezes num sistema hidrológico, coletando os volumes de descargas, tempos descargas e posições do lençol freático, em seguida determinou-se a condutividade hidráulica em valores médios de 1,82 cm/h para solos de Matuba, 1,83 cm/h para solos de Lionde, 3,01 cm/h em solos de Xilembene. A porosidade drenável compreende valores de 0,089 (8,9%) em Matuba, 0,077 (7,7 %) em Lionde e 0,063 (6,3%) em solos de Xilembene, em que observou-se que os solos de Matuba e Lionde possui condutividade hidráulica moderadamente lenta, e os de Xilembene pertence à classe moderada, também os valores da porosidade drenável dos solos encaixam-se na escala de ótimas condições de aeração, condutividade hidráulica, e disponibilidade de água, para o desenvolvimento vegetativo. Após isso foram determinadas as alturas do lençol freático após o rebaixamento com as equações de: Glover-Dumm, Boussinesq-Glover, Skilfgardee, Terzides e Hammad, e espaçamento entre os drenos com as equações de: Donnan, Hooghoudt, Donnan-Hooghoudt, Ernest e Kirkham, testado os valores em Análise de variância (ANOVA\*) há 5% com o teste de Tukey e desvio quadrado médio (DQM), onde todos modelos observados em condições não permanentes podem ser aplicados para o dimensionamento de sistemas de drenagem apesar de que deve haver cautela na aplicação dos modelos de Skilfgardee em Matuba e Glover em Lionde e Xilembene pois pouco-se adequam na determinação da variação de altura do lençol freático, enquanto a eficiência regime permanente destaca-se no modelo de Donnan para solos de Matuba, modelo de Donnan-Hooghoudt em solos de Lionde e os modelos de Donnan e Donnan-Hooghoudt em solos de Xilembene.

**Palavras-chaves:** Drenagem, Equações, Regime Permanente e Regime não permanente

## **Abstract**

Much of agricultural areas are located in drainage difficulties, classified by low productions, where drainage demand in these areas is justified by excessive application of water blades, causing the water table to rise and salt accumulation in the layer soil, exploited by the root system of crops, requiring a drainage system. The present study aims to evaluate the agricultural drainage equations in the soils of Chókwè irrigation, in order to observe the efficiency of equations in the removal of excess water under permanent and non-permanent flow, where three samples were collected from Soil there are 30 cm deep, simulated 5 times in a hydrological system, collecting discharge volumes, discharges and water table positions, then determined hydraulic conductivity in average values of 1.82 cm/h for Matuba soils , 1.83 cm/h for Lionde soils, 3.01 cm/h in soils and Xilembene. The drainable porosity in the values of 0.089 (8.9%) in Matuba, 0.077 (7.7%) in Lionde and 0.063 (6.3%) in Xilembene soils, which was observed that the soils of Matuba and Lionde It has moderately slow hydraulic conductivity, and those of Xilembene belongs to the moderate class, also the values of the drainable porosity of soils fit the scale of great aeration conditions, hydraulic conductivity, and water availability, for vegetative development. After this were determined the heights of the water table after relegation with the equations of: Glover-Dumm, Boussinesq-Glover, Sckilfgardee, Terzides and Hammad, and spacing between the drains with the equations of: Donnan, Hooghoudt, Donnan-Hooghoudt, Ernest and Kirkham, tested the values in variance analysis (ANOVA\*) there is 5% with the Tukey test and medium square deviation (DQM), where all models observed under non -permanent conditions can be applied for drainage systems sizing despite being That there should be caution in the application of Sckilfgardee models in Matuba and Glover in Lionde and Xilembene because they are little suitable for determining the variation of the water table, while the permanent regime efficiency stands out in the Donnan model for Matuba soils, Donnan-Hooghoudt model in Lionde soils and Donnan and Donnan-Hooghoudt models in Xilembene soils.

**Keywords:** Drainage, Equations, Permanent regime and Non-permanent regime

## INTRODUÇÃO

Grande parte de áreas agrícolas, localizam-se em zonas com dificuldade de drenagem, classificadas por baixas produções (Silveira, 2020), onde demanda de drenagem justifica-se pela aplicação excessiva de lâminas de água (Hulugalle *et al.*, 2010), ocasionando a elevação do lençol freático (Abduljaleel *et al.*, 2023), acúmulo de sais na camada de solo, explorado pelo sistema radicular das culturas e a contaminação água dos aquíferos. (Miranda *et al.*, 2021)

O processo de salinização nos solos pode ser causado pela rocha ou pelos processos antrópicos (Resende *et al.*, 2014), que se resume em aplicação de enormes quantidades de pesticidas poluindo o solo, ar e água (Correia *et al.*, 2010), tornando-se um risco potencialmente agressivo na produção agrícola, por incapacidade de lixiviação dos solos e má distribuição de chuvas (Souto *et al.*, 2016), com a variabilidade de escoamentos superficiais, torna se comum o uso de fontes subterrâneas, onde ocorre altos índices de sais que reduz as produções (Lima *et al.*, 2014). Ao controlar a elevação do lençol freático, os drenos alteram os caminhos de escoamentos, e transporte de nutrientes de terras cultivadas para corpos de águas superficiais (Boico *et al.*, 2022).

Ainda que a drenagem considera-se o método de remoção de água em excesso no solo de modo a habilitar condições favoráveis para a produção das culturas, (Miranda *et al.*, 2018), a modelagem desses sistemas requerem a precisão no conhecimento de propriedades hidráulicas do solo (Trejo & Alonso *et al.*, 2023; Argunhan & Atalay *et al.*, 2021), como condutividade hidráulica ( $K_0$ ), porosidade drenável ( $\mu$ ), que descrevem o movimento de água nos solos (Batsilas *et al.*, 2023).

O dimensionamento de sistemas de drenagem profunda ocorre de duas formas, quando o fluxo de recarga é permanente, os drenos são instalados para manter o nível do lençol freático durante o evento de chuva, frequente em regiões com chuvas de baixa intensidade e longa duração, e não permanente quando os drenos são instalados para reduzir o nível do lençol freático habilitando condições para o próximo evento de chuva, frequente em regiões com chuvas de alta intensidade e curta duração (Albuquerque *et al.*, 1990). A determinação de espaçamento entre os drenos torna-se indispensável pois, é um dos fatores que possibilita a implementação dos projetos de drenagem. O aumento de profundidade dos drenos causa aumento no espaçamento entre os drenos reduzindo o número de drenos por hectare afetando a eficiência do sistema e acarretado custo de escavação. (Tavares *et al.*, 2018a)

Diversas metodologias foram desenvolvidas atendendo as condições de recargas, para estimar a profundidade, espaçamento e comprimento entre os drenos usando os parâmetros hidráulicos dos solos (Argunhan & Atalay *et al.*, 2021), assim com a diversidade das propriedades do solo e clima, algumas metodologias aplicam-se melhor em relação a outras, levando a necessidade de julgamento de modo a distinguir o melhor modelo (Albuquerque *et al.*, 1990), sendo que dos diversos estudos feitos destaca-se a equação de Donnan, Donnan-Hooghoudt, Khirkhan e Ernest no fluxo permanente, e a de Glover-Dumm, Glover, Boussinesq-Glover, Hammad, Terzides, Sckilfgardee e Khirkhan no fluxo não permanente, como as mais usadas, (Souza *et al.*, 2014; Muma *et al.*, 2017; Albuquerque *et al.*, 1990 ). O Duarte *et al.*,(2001) definindo a equação mais apropriada, usando areia, obteve como melhor equação à de Boussinesq-Glover na camada impermeável, e acima da camada impermeável à de Sckilfgardee e Glover-Dumm. O Tavares *et al.*,(2018) avaliando equações no regime permanente e não permanente, assegura que os modelos de Glover-Dumm, Glover, Boussinesq-Glover, Hammad, Terzides, Sckilfgardee, e Khirkhan, podem ser aplicado no dimensionamento de drenos, e no regime permanente o modelo de Khirkhan é o pior modelo. A Miranda *et al.*,(2018), desenvolvendo um algoritmo computacional usando o método de Hooghoudt para solos homogêneos e estratificados, obteve resultados mais próximos aos experimentais, destacando o modelo como mais eficiente.

O Pinto *et al.* (2015), Comparado método proposto por Glover-Dumm e o método de simulação do lençol freático numa área produtiva, obteve semelhança nos resultados, sugerindo que a adequabilidade na aplicação do método tem de se respeitar as restrições exigidas, O Albuquerque *et al.*,(1990) trabalhando com solos minerais e orgânicos, na validade de algumas equações, no fluxo permanente, estabelece uma ordem decrescente de eficiência para aplicação dos modelos de Donnan-Hooghoudt, Hooghoudt e Khirkhan.

O Loureiro *et al.*, (2015), validando equações nas recargas permanentes e não permanentes, para solos várzeas (minerais e orgânicos), destaca como ordem decrescente da eficiência, os modelos de Donnan-Hooghoudt e Khirkhan para recargas permanentes, e Tapp-Moody, Glover, Boussinesq-Sckilfgardee, Bouwer-Sckilfgardee e Hammad, para recargas não permanentes. O Darzi-Naftchali *et al.*(2014), trabalhando com arrazoes da Irlanda, observa uma eficiência nos espaçamentos determinados por equações de Glover-Dumm, Van-Shilfgardee e De-zeeuw-Hellinga no fluxo não estacionário. Porém estas avaliações continuam sendo desenvolvidas assim que as demandas de drenagem nos campos agrícolas evoluem notadamente. Onde o presente estudo, objetiva-se em comparar as equações de drenagem agrícola no meio

laboratorial, em regime permanente e não permanente, nos solos de Norte (Matuba), Centro (Lionde) e Sul (Xilembene) do regadio de chókwe, de modo a destacar as equações que melhor resulta na retirada do excesso de água nestes solos.

## **1.1. Objetivos:**

### **1.1.1. Geral**

Avaliar equações de drenagem agrícola para regimes permanentes e não permanentes em condições laboratoriais.

### **1.1.2. Específicos**

- Determinar os principais parâmetros hidráulicos;
- Avaliar o desempenho das equações de drenagem no contexto de solos agrícolas do sistema de regadio de Chókwe.

## **1.2. Problema e Justificativa**

Os solos do regadio de Chókwe passa pela má drenagem e conseqüentemente a salinidade, dentre muitos estudos feitos, diferentes equações de drenagem podem ser aplicadas no dimensionamento de espaçamento entre os drenos, sendo que a eficiência de cada equação varia com a diversidade das propriedades do solo e clima.

A dificuldade de drenagem num solo produtivo causa o excesso de água ou encharcamento nos solos, ocupando a fase gasosa do solo responsável por transporte de nitrogênio, oxigênio e anidrido carbono, resultando na epistasia das plantas, evolução das raízes adventícias, perda do geotropismo, abscisão prematura das estruturas de reprodução, e a redução do pH causando a toxicidade dos solos por aumentar o índice de certos nutrientes. Por outro lado

Um solo mal drenado causa o excesso de água com o teor elevado de sais, podendo se acumular nas zonas radiculares das culturas ou salinizando os aquíferos, outrossim com a elevação do lençol freático até as camadas superficiais ocorre o processo de capilaridade, podendo se responsabilizar em transportar os sais das camadas profundas até as camadas superficiais, onde as raízes das culturas desenvolvem-se, necessitando da drenagem eficiente para remoção do excesso de água evitando o encharcamento do solo. Um sistema de drenagem eficiente disponibiliza a fase gasosa do solo, reduz o índice de salinização por lixiviação, habilitando as condições favoráveis para o desenvolvimento radicular de modo a potencializar as produções (Silveira, 2020).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Drenagem agrícola

O método de remoção de água em excesso no solo de modo a habilitar condições favoráveis para a produção das culturas, e a utilização da área por longo tempo através da instalação de drenos, que recebem escoamentos do perfil do solo denomina-se drenagem agrícola (Miranda *et al.*, 2018). O processo de drenagem estabelece ambientes favoráveis para produção agrícola em áreas com problemas ocasionados pelo excesso de água no solo (Tavares *et al.*, 2018). A drenagem agrícola adaptada de forma superficial (Valas e canais de drenagem abertas) é adequado para remoção do excesso de água, a que é feita por drenos enterrados há certa profundidade é adequado para o controle do lençol freático. (Souza, 2022)

Em áreas relativamente planas, que ocupam posição baixa no relevo, usadas na agricultura irrigada, demonstrando limites máximos produtivos nas regiões áridas e semi-áridas, a maioria dessas áreas estão sujeitas ao processo de salinização do solo, quando a implementação e manuseio de sistemas de drenagem são inadequada (Almeida *et al.*, 2001). Tornando um risco potencialmente agressivo na produção agrícola, por incapacidade de lixiviação dos solos e má distribuição de chuvas (Souto *et al.*, 2016), com a variabilidade de escoamentos superficiais, torna se comum o uso de fontes subterrâneas, onde ocorre altos índices de sais que reduz as produções (Lima *et al.*, 2014). Ao controlar a elevação do lençol freático, os drenos altera caminhos de escoamentos, e transportes de nutrientes de terras cultivadas para corpos de águas superficiais (Boico *et al.*, 2022). Ainda que a drenagem considera-se o método de remoção de água em excesso no solo de modo a habilitar condições favoráveis para a produção das culturas, (Miranda *et al.*, 2018), a modelagem desses sistemas requerem a precisão no conhecimento de propriedades hidráulicas do solo (Trejo & Alonso *et al.*, 2023; Argunhan & Atalay *et al.*, 2021) , como condutividade hidráulica (Ko), porosidade drenável ( $\mu$ ), que descrevem o movimento de água nos solos (Batsilas *et al.*, 2023).

O dimensionamento de sistemas de drenagem profunda ocorre de duas formas, quando o fluxo de recarga é permanente, os drenos são instalados para manter o nível do lençol freático durante o evento de chuva, frequente em regiões com chuvas de baixa intensidade e longa duração, e não permanente quando os drenos são instalados para reduzir o nível do lençol freático habilitando condições para o próximo evento de chuva, frequente em regiões com chuvas de alta intensidade e curta duração (Albuquerque *et al.*, 1990a).

## 2.2. Taxa de descarga ou coeficiente de descarga

A taxa de descarga (coeficiente de descarga) resulta no volume de água extraído numa área em função do tempo, para permitir a aeração necessária ao bom desenvolvimento das raízes das culturas. Normalmente, é expressa em lâmina de água por dia, dado requerido nas fórmulas para cálculo do espaçamento entre drenos subterrâneos (Amorim, 1995). Em condições laboratoriais o conhecimento da taxa de descarga possibilita a determinação do parâmetro hidráulico como na porosidade drenável, e também compreende o fluxo de água no solo (Tavares *et al.*, 2018a). O fluxo deste fator na prática depende da condutividade hidráulica que resulta da permeabilidade do solo, a equação 1, traduz-nos o processo de determinação da taxa de descarga.

$$q = \frac{vd}{t} \quad (1)$$

Onde:

q - Taxa de descarga (m<sup>3</sup>/dia)

Vd - Volume de descarga (m<sup>3</sup>)

t- Tempo de descarga (dia)

## 2.3. Condutividade hidráulica

Condutividade hidráulica é o coeficiente numérico traduzido na circulação de água no solo, com poros granulares, a variação granulométrica do solo, causa a diferença de condutividade hidráulica em pontos diferentes do solo. Os solos excessivamente porosos apresentam alta condutividade hidráulica, desta forma qualquer estudo de condutividade hidráulica deve ter em conta a macro porosidade (Verner & Araujo, 2018)

A condutividade hidráulica (ou constante de proporcionalidade) de um solo saturado é um dos parâmetros importantes no dimensionamento da capacidade de drenagem. Ela é constante para cada tipo de solo, isto é, dependerá somente da textura e da estrutura do solo (Silveira, 2020). Ela traduz nos, o comportamento do solo quanto ao movimento de água, transporte de elementos químicos, nutrientes e defensivos agrícolas, bem como a descrição da funcionalidade de seu sistema poroso, na qual engloba propriedades relacionadas com a sua porosidade, como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. (Tavares *et al.*, 2018a).

O Verner & Araujo,(2018) estabelece que os valores da condutividade hidráulica entre 0,1 a 0,5 cm h-1 são considerados lenta e de 0,5-2,0 cm h-1, considerada moderada. De acordo com Ribeiro *et al*,(2007) A determinação incorreta deste parâmetro hidráulico, leva à subestimação ou superestimação do espaçamento entre os drenos. A tabela abaixo estabelecido por Bernardo, (2008), apresenta classificação da condutividade hidráulica dos solo.

**Tabela 1:** Classificação das Condutividade Hidráulicas

Numeri de Classe	Condutividade hidráulica (cm/h)	Descrição
1	0.125 a 0.5	Condutividade Hidráulica Baixa
2	0.5 a 12.5	Condutividade Hidráulica Moderada
3	12.5 acima de 25	Condutividade Hidráulica Alta

**Fonte:** BERNARDO (2008).

A equação abaixo determina a condutividade hidráulica por método de permeâmetro de carga constante.

$$K_0 = \frac{V*L}{A*t*(L+h)} \quad (2)$$

Onde:

$K_0$  – Condutividade Hidráulica.

V – Volume descarrega (cm<sup>3</sup>);

L – Altura de a areia (cm);

A - Área da secção transversal (cm<sup>2</sup>)

t- Tempo de descarga (min)

h - Carga hidráulica (cm)

Quando a temperatura do volume de água coletado é 24°C, é necessário corrigir a condutividade hidráulica determinada nesta temperatura, para 20°C considerado padrão. Com a expressão, abaixo, sendo que a viscosidade de água à temperatura, 24°C, é 0,9142 CentiPoise (cP), e na de 20°C, é de 1,0050 cP., (Bernardo, 2008b).

$$\frac{K_{020}}{K_{0T}} = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \quad (3)$$

Onde:

$K_{020}$  – Condutividade hidráulica na temperatura  $20^{\circ}C$ , em (cm/min),

$\mu_T$  – Viscosidade absoluta da água à temperatura T, medida durante o teste, cP; e

$\mu_{20}$  – Viscosidade absoluta da água, em CentiPoise (cP).

#### 2.4. Carga hidráulica

Carga hidráulica corresponde a altura ou lâmina de água que pode ser transportada de um lugar para outro a uma certa pressão e diferentes tipos de qualidade. O parâmetro é notadamente verificado nos cursos de água, ou a elevação do lençol freático. O dimensionamento de um sistema de drenagem com drenos tubulares inclui a relação entre a carga hidráulica (h) no semi-espacamento entre os drenos e a distância entre eles (L), (Tavares *et al.* 2018).

#### 2.5. Porosidade drenável

Porosidade drenável ( $\mu$ ), denomina-se a quantidade do solo ou porosidade total por onde a água, apresenta escoamentos livres (Sousa *et al.*, 2022). Ou por outras é o limite máximo da capacidade de campo que necessita de drenagem (Vasconcelos *et al.*, 2017). Afirma o Ribeiro *et al.*(2007) que este parâmetro hidráulico, é responsável pela drenagem e aeração do solos. Em condições laboratoriais a porosidade drenável resulta do volume de água drenado pelo volume total de solo (Tavares *et al.*, 2018a) conforme indica a equação 4.

$$\mu = \frac{V_s}{V_a} \quad (4)$$

Onde:

$\mu$ -Porosidade drenável;

$V_s$ -Volume total do solo;

$V_a$ -Volume da água descarregada.

Segundo o Ribeiro *et al.*(2007), a metodologia da determinação do valor real da porosidade drenável é complexa nas condições do campo, onde a porosidade drenável é obtida em função do rebaixamento do lençol freático e da lâmina contida neste rebaixamento. A macro porosidade deve estar próxima de  $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , mostrando um equilíbrio na distribuição do tamanho dos poros (Ribeiro *et al.*, 2007).

A variação espacial do solo, é causado pela diversidade das condições do local, como temperaturas, mineralogia entre outros fatores, que por sua vez o solo varia da textura grossa a

fina, que pode ser diferenciado pelos níveis de movimento de água no solo, devido à sua graduação, com isso variados tipos de estudos são feitos para determinar as propriedades hidráulicas dos solos, para compreender a sua aplicação. A porosidade drenável é uma das propriedades que os solos têm permitido o movimento de água no solo. Para o (Sobrinho *et al.*, 2007), sugere que a porosidade drenável pode ser obtida pela equação abaixo;

$$\mu = \sqrt{K} \quad (5)$$

Onde:

$\mu$ -Porosidade drenável (cm/cm);

K- Condutividade hidráulica (cm/h),

O Sobrinho *et al.*, (2007), afirma que, Chossat & Saugnac, Otto (1988), e Poulsen et al. (1999a, 1999b) definiram a relação entre  $\mu$  e  $K_o$ , umidade do solo saturado

$$\mu = 0,025 + 0,006K_o \quad (\text{Chossat e Saugnac 1}) \quad (6)$$

$$\mu = 0,0153 + 0,017\sqrt{K_o} \quad (\text{Chossat e Saugnac 2}) \quad (7)$$

$$\mu = 0,033 * K_o^{0,289} \quad (\text{Chossat e Saugnac 3}) \quad (8)$$

$$\mu = 6,37238 + 0,457879\sqrt{K_o} \quad (\text{Otto 1}) \quad (9)$$

$$\mu = 2,53619K_o^{0,309505} \quad (\text{Otto 2}) \quad (10)$$

$$\mu = 0,066137 * K_o^{\frac{1}{3,15}} * \theta_s^{2/3} \quad (\text{Poulsen A}) \quad (11)$$

$$\mu = 10^{[(\log \log K_o - 4,3)/2,8]} \quad (\text{Poulsen B}) \quad (12)$$

$$\mu = 0,066137 * K_o^{\frac{1}{3,15}} * \theta_s^{2/3} \quad (\text{Poulsen A}) \quad (13)$$

$$\mu = 10^{[(\log \log K_o - 4,3)/2,8]} \quad (\text{Poulsen B}) \quad (14)$$

Onde:

$\mu$  -Porosidade drenável em (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);

$K_o$ -Condutividade hidráulica do solo saturado em m/d

$\theta_s$ - Umidade de saturação (cm<sup>3</sup> /cm<sup>3</sup>).

Com o volume das amostras e os pesos correspondentes à saturação e às sucções de 6 e 10 kPa, calculou-se a porosidade drenável conforme, Queiroz (1995):

$$\mu = \theta_S - \theta_{CC} \quad (15)$$

Onde:

$\mu$  -Porosidade drenável (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);

$\theta_S$ -Umidade, base volume, na saturação (cm/ cm<sup>3</sup>);

$\theta_{CC}$ -Umidade, base volume, na capacidade de campo (cm/cm<sup>3</sup>).

## 2.6. Espaçamento entre drenos

O espaçamento entre os drenos refere-se à distância longitudinal entre os tubos de drenagem (coletores) no campo a uma certa profundidade. Sendo a instalação de drenos a uma profundidade maior, aumenta o espaçamento dos drenos acarretando mais custos de escavação. Geralmente estabelece que a profundidade ideal dos drenos se limita entre 1,2 e 1,5 metros (Tavares *et al.*, 2018). A determinação de espaçamento entre os drenos torna-se indispensável pois, é um dos fatores que possibilita a implementação dos projetos de drenagem. O aumento de profundidade dos drenos causa aumento no espaçamento entre os drenos reduzindo o número de drenos por hectare afetando a eficiência do sistema e acarretado custo de escavação. (Albuquerque *et al.*1990; Tavares *et al.*, 2018)

### 2.6.1. Equações do regime permanente

O regime constante é aquele em que a posição do lençol freático permanece inalterada durante a chuva, ou seja, a quantidade de chuva que entra menos a água consumida pelas plantas e evaporada é a mesma que sai pelos drenos, de modo que o lençol freático não se eleva e nem é rebaixado. Este regime aplica-se em regiões onde as chuvas são de baixa intensidade e longa duração, (Tavares *et al.*, 2018). O Albuquerque *et al.*,(1990) trabalhando com solos minerais e orgânicos, na validade de algumas equações, neste regime de recarga, estabelece uma ordem decrescente de eficiência para aplicação os modelos de Donnan-Hooghoudt, Hooghoudt e Khirkhan, O Tavares *et al.*, 2018, trabalhando neste fluxo observa eficiência na equação de Donnan, Hooghoudt, e Ernest e ineficiência na equação de Khirkhan. O Loureiro *et al.*, (2015), validando equações nas recargas permanentes, para solos várzeas (minerais e orgânicos), destaca como ordem decrescente da eficiência, os modelos de Donnan-Hooghoudt e Khirkhan. A Miranda *et al.*,(2018), desenvolvendo um algoritmo computacional usando o método de Hooghoudt para solos homogêneos e estratificados, obteve resultados mais próximos aos experimentais, destacando o modelo como mais eficiente

**Tabela 2:** Equações de drenagem agrícola no fluxo permanente

Nomes	Equação	Fonte	Nº
<b>Donnan</b>	$L = \sqrt{\frac{8K_0(H^2 - D^2)}{q}} \quad \therefore H = h + D$	Tavares <i>et al.</i> (2018)	16
<b>Hooghoudt</b>	$L = \sqrt{\frac{8K_0dh + 4K_0h^2}{q}} \quad \therefore d = \frac{D}{[2,5(\frac{D}{L}) \times \ln(\frac{D}{PM}) + 1]}$	Tavares <i>et al.</i> (2018).	17
<b>Donnan-Hooghoudt</b>	$L = \sqrt{\frac{8K_0dh + 4K_0h^2}{q}}$	Loureiro <i>et al.</i> (2015)	18
<b>Ernest</b>	$L = \frac{\frac{q \times \ln\left(\frac{D}{PM}\right)}{\pi K_0} \pm \sqrt{\left(\frac{q \times \ln\left(\frac{D}{PM}\right)}{\pi K_0}\right)^2 - 4\left(\frac{q}{8K_0} - h\right)}}{\left(\frac{q}{8K_0}\right)}$	Tavares <i>et al.</i> (2018)	19
<b>Kirkham</b>	$L = \frac{K_0h}{qF_k} \quad \therefore F_k = \frac{1}{\pi} \left[ \ln\left(\frac{L}{\pi r_0}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \cos\left(\frac{2n\pi r_0}{L}\right) \right) - \cos(n\pi) \times \coth\left(\frac{2n\pi D}{L}\right) - 1 \right]$	Tavares <i>et al.</i> (2018)	20

Onde:

L - Espaçamento entre os drenos (m),

K<sub>0</sub> - Condutividade hidráulica (m/dia),

D - Distância da camada impermeável ao nível de água dos drenos(m),

h - Distância vertical entre o nível do lençol no ponto médio entre os drenos e o plano tangente ao fundo dos drenos (m),

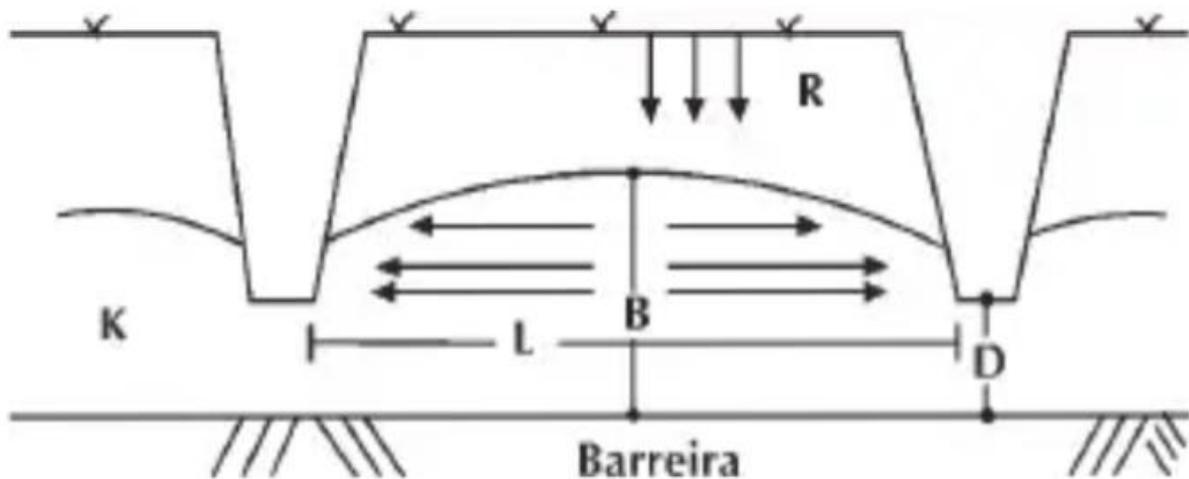
q - Taxa de descarga (m/dia), e

PM: Perímetro molhado (m).

$r_0$ : Raio hidráulico

### a) Equação de Donnan

O modelo Donnan foi habilitado para o fluxo horizontal, proveniente da irrigação, para as condições do uso de recargas permanentes com o lençol freático constante, fluxo horizontal, solos homogênea até a camada impermeável, sistemas de drenos paralelos infinitos, recarga homogeneamente distribuída e dreno assentados pouco acima da camada impermeável. (Barcelos, 2021), conforme apresenta a equação 16 da tabela 2, e a figura 1.



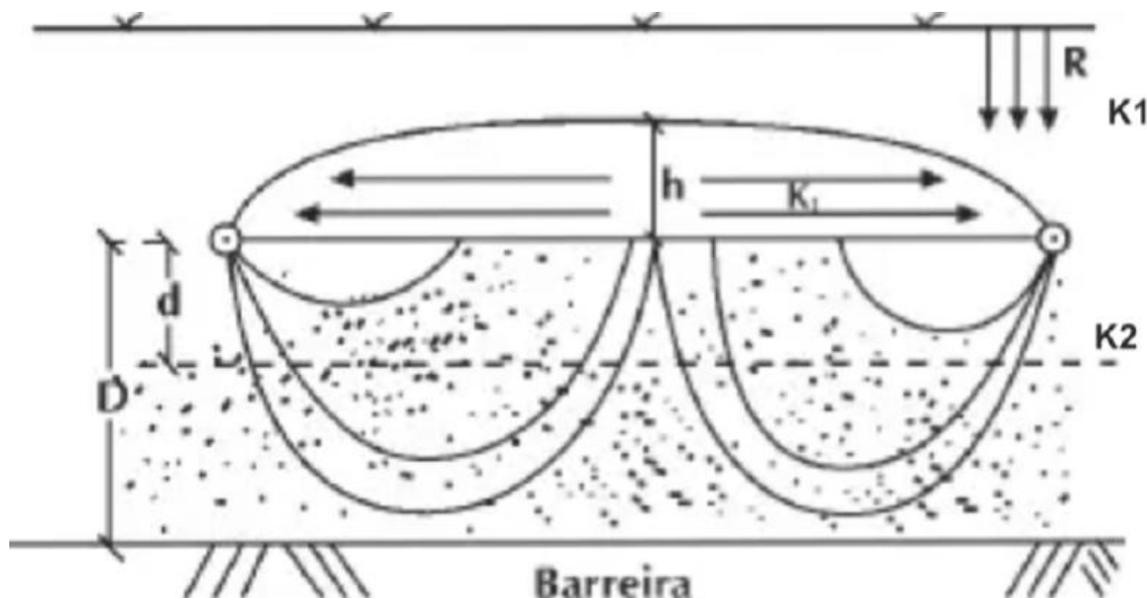
**Figura1;** Desenho mostrando parâmetros utilizados no Equação de Donnan

**Fonte:** Adaptado por Barcelos (2021).

### b) Equação de Hooghoudt

A equação do Hooghoudt foi desenvolvida a partir da equação de Donnan, para valas de drenos assentados acima da camada impermeável, sob condições de regime permanente, considerando fluxo horizontal e radial no solo sobre os drenos (Barcelos, 2021). Na aplicação desta equação considera-se seguintes princípios, fluxo de água contínua, drenos paralelos e equidistantes, gradiente hidráulico em qualquer ponto do terreno igual ao à inclinação do lençol freático sobre o ponto considerado  $-dy/dx$ . A mesma equação considera casos em que o solo acima dos drenos se difere aos solos abaixo dos drenos, o que resulta na diferença da condutividade hidráulica. (Barcelos, 2021), conforme apresenta a equação 17 da tabela 2, e a figura 2. No estudo feito por (Ribeiro *et al.*, 2007), para os solos orgânicos nas condições em que  $d \neq 0$ , este modelo superestimou o espaçamento entre os drenos.

Hooghoudt (1940) simulou o escoamento para ralos de ladrilhos, assumindo um escoamento radial de água subterrânea ao redor dos ralos quando a camada impermeável não coincide com o fundo do ralo. Utilizando a teoria de Dupuit-Forchheimer, sua análise resultou no conceito de profundidade equivalente, que é definida como uma profundidade imaginária da camada impermeável abaixo dos ralos das telhas (O'Neill, 2008).



**Figura 2;** Desenho mostrando parâmetros utilizados na Equação de Hooghoudt

**Fonte:** Adaptado por Vinícius Barcelos (2021).

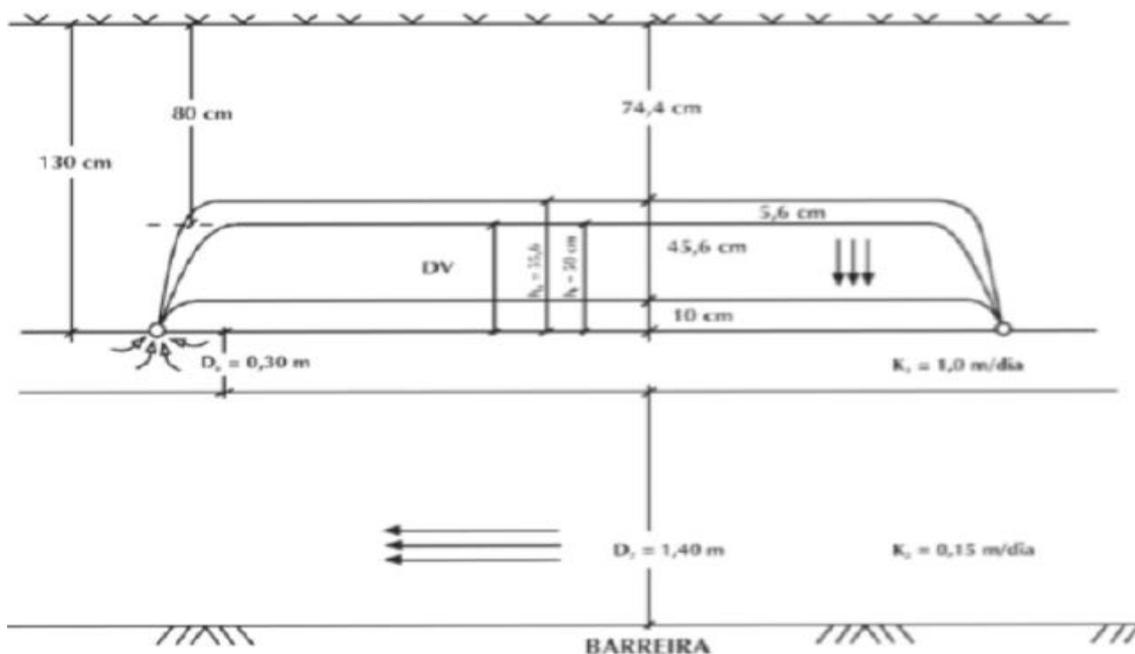
#### c) Equação de Donnan-Hooghoudt

A equação Donnan-Hooghoudt é a equação modificada de Donnan e Hooghoudt, adaptado apenas para o fluxo horizontal o que comprova a tese de Dupuit-Forchheimer, cujo o solo homogêneo, drenos paralelos, validade da lei de Darcy do movimento de água no solo, e recarga contínuas, conforme apresenta a equação 18 da tabela 2, e a figura 3. Ribeiro *et al.*,(2007) fazendo o estudo de comparação de equações de drenagem no fluxo continua, para os solos Orgânicos e Minerais, observa eficiência na equação modificada de Donnan-Hooghoudt, quando o  $d/H > 0,4$  em solos orgânicos e quando  $d \neq 0$ , em solos minerais.

#### d) Equação de Ernest

Ernest em 1956-1962 desenvolveu uma equação (equação 19 da tabela 2), para solos estratificados partindo das soluções do Hooghoudt, considerando o fluxo vertical, horizontal e radial. Esta equação é classificada como uma das melhores equações de drenagem agrícola no fluxo permanente, conforme assegura o estudo de Tavares *et al.*(2018) a figura e a equação

abaixo demonstra os parâmetros considerado pelo Ernest para o cálculo de espaçamento entre os drenos



**Figura 3:** Esquema de parâmetros para o modelo de Ernest

**Fonte:** Adaptado por Vinícius Barcelos (2021).

#### e) Equação de Kirkham

Assed & Kirkham (1966), trabalhando com modelo laboratório, utilizando como material poroso esferas de vidro de diâmetro 2 mm e glicerol como fluido, testaram a teoria de Bouwerschilfgardee. Verificaram os valores teóricos de  $h_t$  (altura máxima do LF sobre os drenos após um intervalo de tempo  $t$  de seu rebaixamento) coerente do modelo, este modelo pode ser usado tanto quando as recargas forem permanentes e variáveis (Tavares *et al.*, 2018a).

Kirkham (1958) evitou as suposições simplificadoras da teoria de Dupuit-Forchheimer e forneceu uma solução matemática exata para o problema de drenagem, resolvendo a equação de Laplace usando a teoria do potencial. A solução de Kirkham não apenas fornece uma estimativa do espaçamento do dreno, mas também apresenta a distribuição da carga de pressão na zona de fluxo. conforme apresenta a equação 20 da tabela 2. Darzi-Naftchali *et al.*(2014), trabalhando com arrazoes da Irlanda, observa uma eficiência nos espaçamentos determinados por equações de Glover-Dumm, Van-Sckilfgardee e De-zeeuw-Hellinga no fluxo não estacionário.

#### 2.6.2. Equações do regime não permanente

O regime não permanente (regime variável) e a recarga de água no solo, caracterizado por chuvas de alta intensidade e curta duração. Neste regime os drenos não conseguem remover a

água da chuva enquanto ela ocorre (Albuquerque *et al.*, 1990). A chuva intensa eleva a altura do lençol freático, tendo que rebaixar de modo a habilitar espaço para o próximo evento de chuva, evitando inundações (Tavares *et al.*, 2018a). As soluções para fluxo unidimensional (a equação de Darcy) e fluxo bidimensional (a equação de Laplace) foram derivadas pela primeira vez em 1872 por COLDING, assumindo o fluxo horizontal na zona saturada (Schilfgardee *et al.* 1957).

O Duarte *et al.*,(2001) definindo a equação mais apropriada no fluxo não permanente, usando areia, obteve como melhor equação à de Boussinesq-Glover na camada impermeável, e acima da camada impermeável à de Sckilfgardee e Glover-Dumm. O Tavares *et al.*,(2018) avaliando equações no regime não permanente, assegura que os modelos de Glover-Dumm, Glover, Boussinesq-Glover, Hammad, Terzides, Sckilfgardee, e Khirkhan, podem ser aplicado no dimensionamento de drenos. O Loureiro *et al.*, (2015), validando equações nas recargas permanentes e não permanentes, para solos várzeas (minerais e orgânicos), destaca como ordem decrescente da eficiência, os modelos de Tapp-Moody, Glover, Boussinesq-Sckilfgardee, Bouwer- Sckilfgardee e Hammad, para recargas não permanentes.

**Tabela 3:** Equações de drenagem agrícola no fluxo não permanente

<b>Nomes</b>	<b>Equação</b>	<b>Fonte</b>	<b>Nº</b>
<b>Glover-Dumm</b>	$h_t = \frac{1,16h_0}{e^{\frac{\pi^2 k_0 \times D \times t}{\mu L^2}}}$	Tavares <i>et al.</i> (2018)	21
<b>Boussinesq-Glover</b>	$h_t = \frac{2h_0 \mu L^2}{9k_0 \times t \times + h_0 2\mu L^2}$	Tavares <i>et al.</i> (2018).	22
<b>Sckilfgardee</b>	$h_t = \frac{2h_0 \mu L^2}{\left( e^{\frac{\pi^2 k_0 \times D \times t}{\mu L^2}} (2D + h_0) - h_0 \right)}$	Tavares <i>et al.</i> (2018)	23
<b>Terzidis</b>	$h_t = D \cdot \ln \left( 1 - \frac{4 \left( 1 - e^{\frac{h_0}{D}} \right)}{\pi \times e^{\left( \frac{h_0}{1,16L\mu} \right)}} \right)$	Tavares <i>et al.</i> (2018)	24

<b>Hammad</b>	$h_t = \frac{h_0}{e^{\left(\frac{2\pi h_0 t}{\mu L \times \ln\left(\frac{L^2}{2\pi^2 r \times D}\right)}\right)}}$	Tavares <i>et al.</i> (2018)	25
<b>Kirkham</b>	$h_t = \frac{h_0}{e^{\left(\frac{K_0 t}{1.16 L \mu}\right)}}$	Tavares <i>et al.</i> (2018)	26
<b>Glover</b>	$h_t = \frac{4h_0}{\pi e^{\left(\frac{\pi^2 h_0 D t}{\mu L^2}\right)}}$	Tavares <i>et al.</i> (2018)	27

Onde:

$h_t$ : Altura do lençol freático após o rebaixamento(m);

$h_0$ : Altura do lençol freático antes do rebaixamento(m);

$\mu$ : Porosidade drenável (adimensional);

L: Espaçamento entre os drenos (m);

$K_0$ : Condutividade hidráulica do solo (m.dia-1);

t: tempo (dias); e

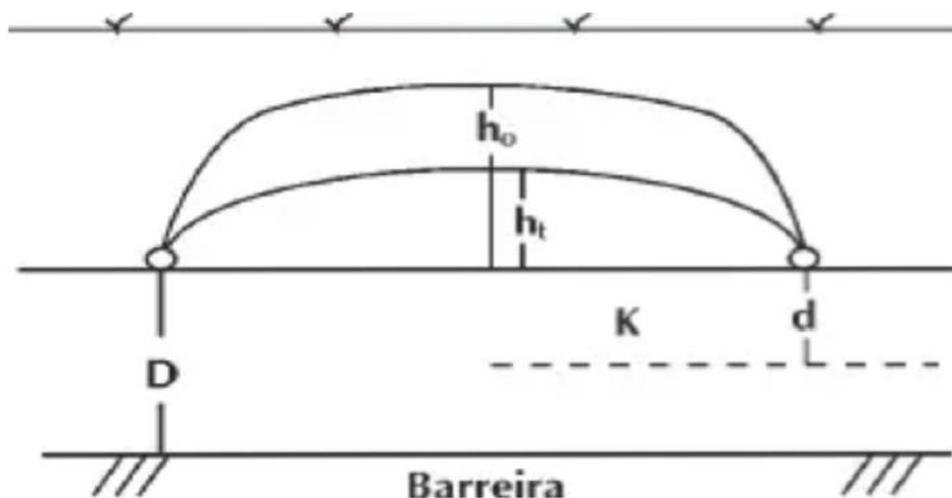
D: Altura da camada impermeável até a linha dos drenos (m).

#### a) Equação de Glover-Dumm

Para o estudo drenagem no regime não permanente, Glover usou as equações de continuidade e darcy, e estabeleceu uma fórmula empírica, adulterado por Dumm, que considerando uma secção transversal de fluxo entre dois drenos, sob condições não saturadas, a quantidade de água de entrada na direção x ( $Q_e$ ) adicionada do volume armazenada num elemento diferencial deve ser igual a quantidade de água de saída ( $Q_s$ ) nesta mesma direção (Albuquerque *et al.*1990).

O Dumm ao evoluir a teoria do fluxo transiente com a análise do lençol freático, notou uma eficiência reprodutiva no uso deste método, na forma inicial e ao longo do rebaixamento do lençol freático, com isso a verificação e o cálculo das variações do lençol freático, só é possível com a aplicação da teoria do fluxo transiente. Esta teoria trata de este problema em dois casos quando os drenos são colocados acima da barreira e sobre a barreira, (Sousa *et al.*, (2014). A figura 4 e a equação 21 da tabela 3, detalham os parâmetros necessários para o uso desta equação. O Pinto *et al.* (2015), Comparado método proposto por Glover-Dumm e o método de

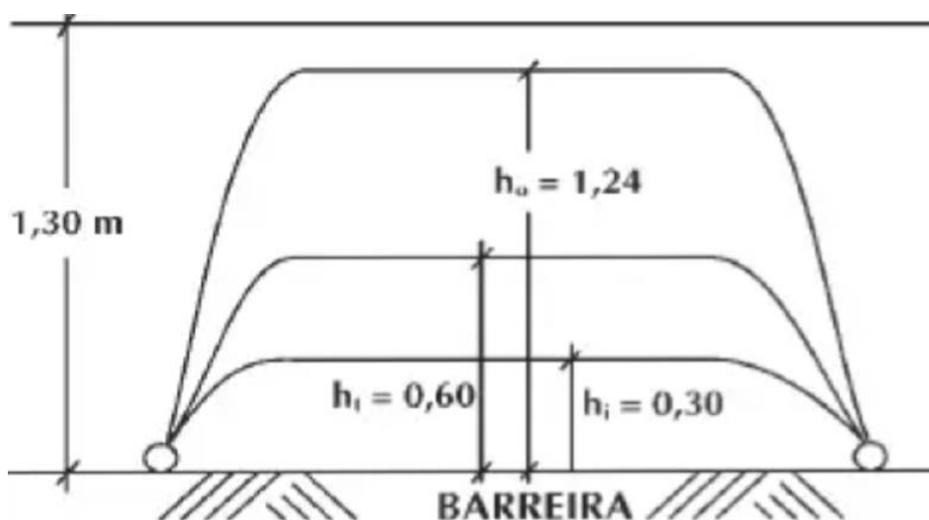
simulação do lençol freático numa área produtiva, obteve semelhança nos resultados, sugerindo que a adequabilidade na aplicação do método quando se respeita as restrições exigidas.



**Figura 4:** Esquema de parâmetros para o modelo de Glover-Dumm  
**Fonte:** Adaptado por Vinícius Barcelos (2021)

#### b) Equação de Boussinesq-Glover

Boussinesq desenvolveu uma equação de drenagem para conexão de zona saturada e não saturada (fluxo horizontal), partindo da equação da continuidade, onde admite-se que a variação do armazenamento depende da posição do lençol freático em relação a superfície do solo, ou seja, a porosidade drenável é uma constante, e representa a lâmina drenada por unidade de rebaixamento do lençol freático e a suporte do solo, e da equação de Darcy que é o comportamento da água na textura do solo (Lousada, 2001). Esta equação foi condicionada com a de Glover para resolver caso de recargas não permanentes (Tavares *et al.*, 2018a), conforme apresenta a equação 23 da tabela 3, e a figura 5.



**Figura 5:** Esquema de parâmetros para o modelo de Boussinesq-Glover

**Fonte:** Adaptado por Vinícius Barcelos (2021)

### c) **Equação de Sckilfgardee**

A equação de Sckilfgardee foi desenvolvida para situações com a variação do lençol freático em determinado tempo. Esta equação melhor desempenha-se quando os drenos estiverem junto com a camada impermeável, conforme apresenta a equação 23, da tabela 3 (Tavares *et al.*, 2018a)

### **Equação de Terzidis**

No estudo feito Tavares *et al.*,(2018) o modelo de Terzidis apresentou melhor desempenho em relação às outras equações do regime variável, com os drenos acima da camada impermeável, conforme apresenta a equação 24, da tabela 3.

### d) **Equação de Hammad**

No estudo feito pelo Tavares *et al* (2018) a equação de Hammad apresentou um grande desempenho, na simulação de drenagem com a variação do lençol freático, recomendando a sua aplicação nas mesmas condições, conforme apresenta a equação 24, da tabela 3.

### e) **Equação de Kirkham**

No estudo feito pelo Tavares *et al.*, (2018) esta equação apresentou melhor desempenho, na simulação de drenagem com a variação do lençol freático, recomendando a sua aplicação nas mesmas condições, assim a equação 25 da tabela 3 apresenta o modelo de Khirkhan para dimensionamento de sistemas de drenagem.

### f) **Equação de Glover**

No estudo feito pelo Tavares *et al.*, (2018) esta equação de Glover apresentou pior desempenho, na simulação de drenagem com a variação do lençol freático, sendo pouco recomendado nas mesmas condições, assim a equação 26 da tabela 3 apresenta o modelo de Glover para dimensionamento de sistemas de drenagem.

## **2.7. Avaliação do desempenho das equações**

A eficiência das equações não permanentes observou se com o teste de desvio quadrado medio (DQM), conforme sugere o Sousa *et al.* (2015), em que se diferencia o valor experimental e o valor obtido no modelo, e representou se a eficiência pelos gráficos da redução do lençol freático em função do tempo de descarga, na qual distingue se os dados do modelo que se alinha aos dados experimentais tornando-o mais eficiente. (Tavares *et al.*, 2018). a expressão abaixo indica os procedimentos da determinação do desvio medio quadrado.

$$DQM = \sqrt{\frac{(Ht \text{ exp} - Ht \text{ pre})^2}{N}} \quad (27)$$

Onde:

Ht exp = Altura do lençol freático experimental;

Ht pre = Altura do lençol freático predito pelo modelo;

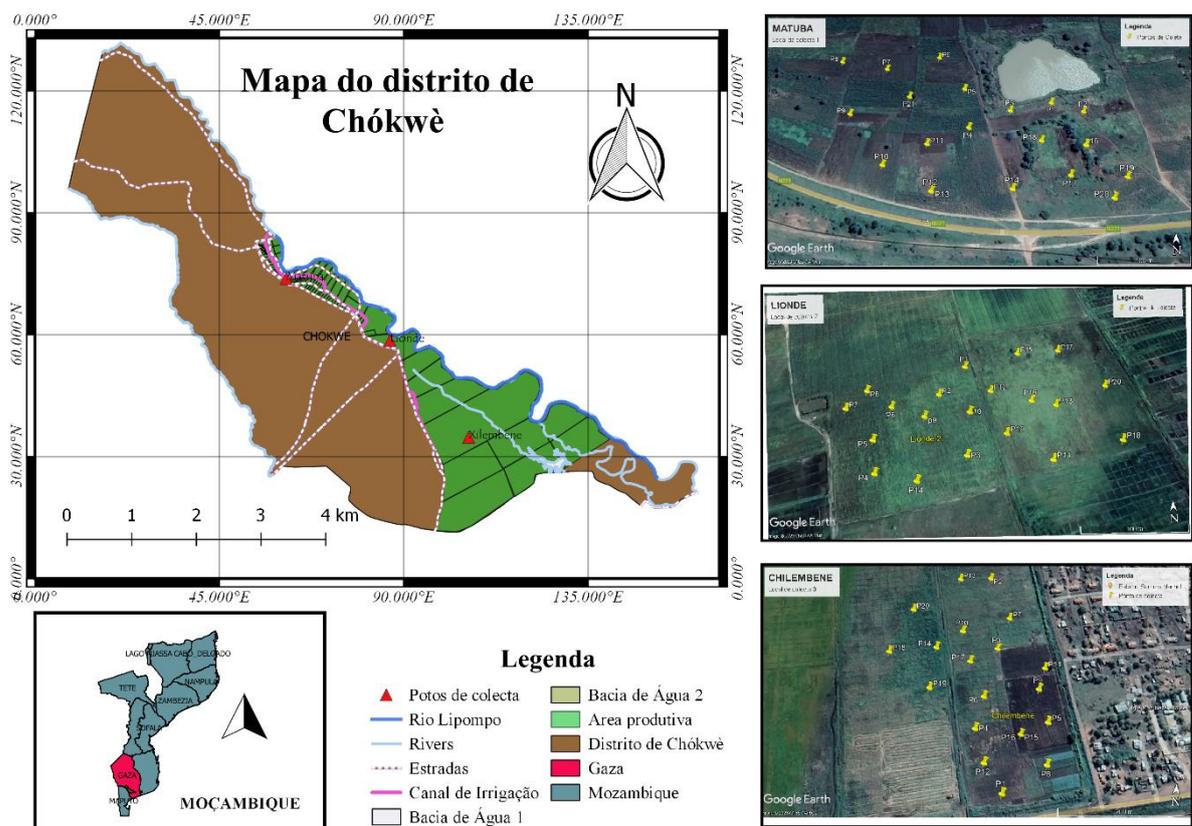
N = Número de dados experimentais.

A avaliação das equações permanentes fez-se com Análise de variância (ANOVA\*), com o teste de Tukey há 5 % de significância dos valores médios dos desvios, onde a sentença foi estabelecido pela comparação do valor experimental e modelar na qual a diferença não tem de ser superior a 0,10 m, para que possa ser considerado eficiente.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Área do estudo

O estudo foi conduzido no regadio de chókwe, onde foram coletadas as amostras do solo, misturadas em 16 pontos, a Norte do regadio “Matuba” (24°28'34.95"S e 32°56'54.76"L), Centro “Lionde” (24°30'50.62"S e 32°59'48.04"L), e Sul do regadio “Xilembene” (24°33'6.73"S e 33° 1'39.70"L). Coletados amostras do solo deformadas numa profundidade de 0 a 30 cm. Analisado no Laboratório de Instituto Superior Politécnico de Gaza, e ordenados em delineamento inteiramente causalizado.



**Figura 6:** Mapa de distrito de chókwe;

**Fonte:** Adaptado pelo Autor

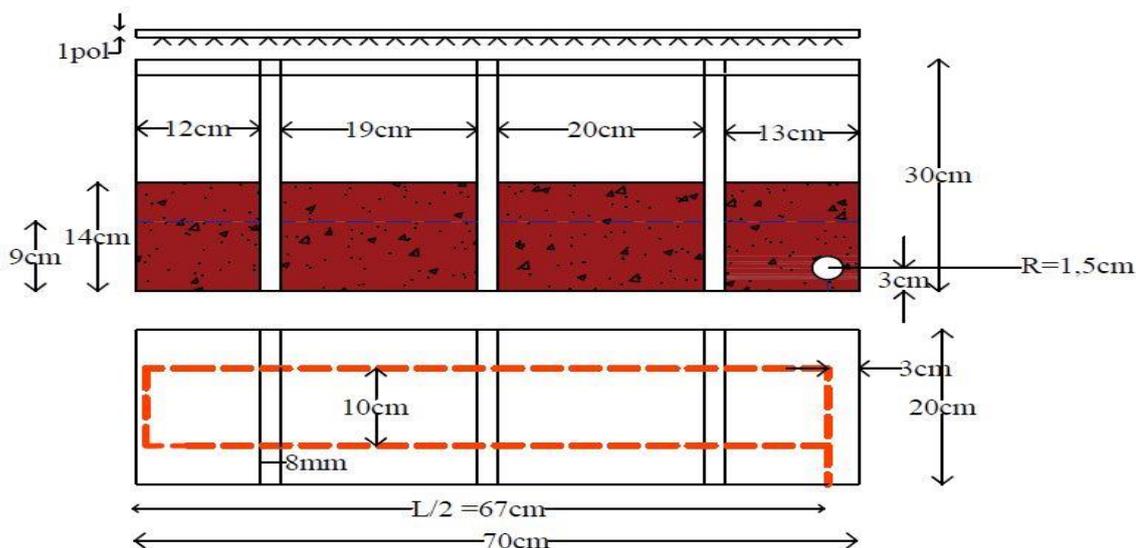
#### 3.1.1. Solos e Clima

Os solos de sistema de regadio de chókwe apresenta diversidade na estrutura, podendo ser causado pela geológico do solo, assim (Timberlake *et al.*, 1986), fazendo levantamento das pastagens e solos do distrito de Chókwe, classifica os solos de Matuba em solos providos de sedimentos fluviais recentes do rio Limpopo, com uma geologia quase plano ate suavemente planos, de textura estratificada em franco arenosa. Os solos de Lionde são solos originados de sedimentos Marinhos pliocenico, com uma geologia plano ate suavemente ondulado, de textura Argilo-Arenosa. Os solos de Xilembene são oirudos em sedimentos marinhos pliocenico, com

declives curtos, a uma textura Argilo-arenosa. O clima é semiárido seco (BS) de acordo com a classificação climática de Köppen. A precipitação anual ronda os 600 mm e a evapotranspiração de referência (Penman, 1948) atinge os 1500 mm anuais (Gomes, 1999)

### 3.2. Procedimentos

Na execução deste estudo estabeleceu-se uma caixa de vidro de 30 cm de altura, 70 cm de comprimento e 20 cm de largura, por cima da caixa foi instalado um tubo de meia polegada (0,5" IPS), também foi perfurado em linha 23 furos, cujo débito médio foi de 4,40 ml/s, em seguida foi instalada uma malha retangular fechada de tubos de drenagem, com 4 linhas de perfurações ao redor do tubo. Os drenos foram instalados a 3 cm do fundo da caixa, com um declive de 0,033 cm/cm em relação ao comprimento da caixa. Usou-se um recipiente de formato geométrico quadrangular, e transparente, graduado em 26 litros, servindo como um mini reservatório para o evento de chuva. (Tavares *et al.*, 2018b)



**Figura 7:** Unidade de estudo hidrológica reduzida.

O Simular de drenagem admite condições em ou pressupostos

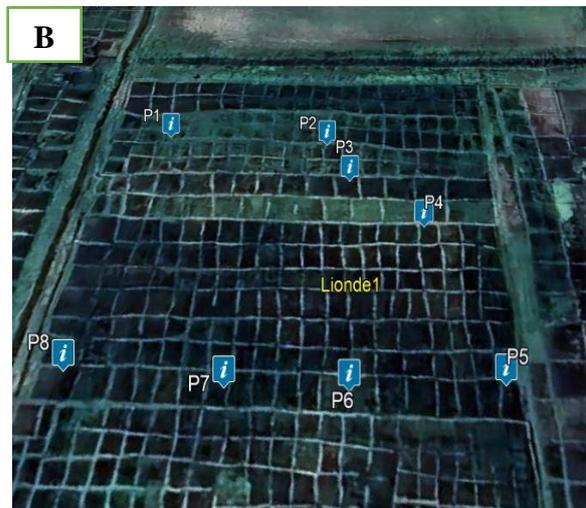
- ✓ O dreno assentado pouco acima da camada impermeável;
- ✓ O fluxo de água no sistema é vertical, horizontal e radial;
- ✓ O solo é homogéneo em toda camada;
- ✓ O gradiente hidráulico em qualquer ponto é igual a inclinação do lençol freático.

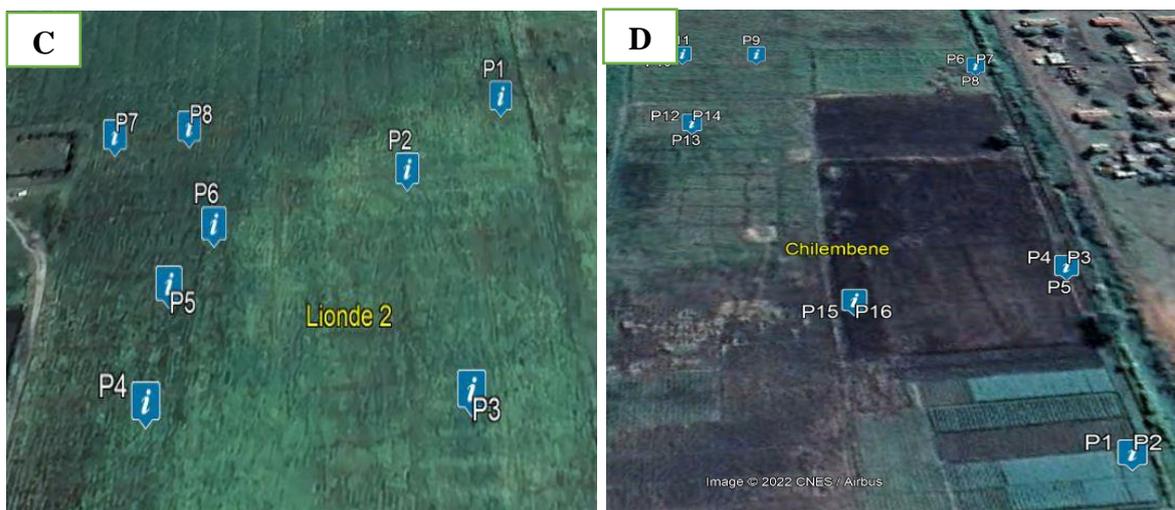


**Figura 8:** Ensaio e registo de dados:

### 3.2.1. Local da coleta:

A colecta das amostras foi feita com uma sonda manual, onde perfurou-se até 30 cm, em 16 pontos que se diferenciava em 20 m, da área de amostragem, os pontos coletados foram identificados com o Locus Maps, o solo coletado foi colocado em sacos plásticos. (Tavares *et al.*, 2018b)





**Figura 9:** Coletas de amostras dos solos: **A**-Matuba; **B**-Lionde 1; **C**-Lionde 2; **D**-Xilembene

### 3.2.2. No laboratório

No laboratório foi calibrado o material com as devidas aberturas, e conectado o sistema completo, depois foram executadas as amostras há 14 cm nos devidos compartimentos e foram instalados poços de observação, encheu se o recipiente até no nível de 26 litros, com as válvulas do controlo de dreno e de simulação de chuva fechadas. Adotou como simulação permanente, o evento de chuva constante e a descarga constante, até verificar se a altura do lençol freático constante e coletou o volume descarregado com a proveta de 2 litros durante 2 minutos, e mediu se a altura do lençol freático apos a coleta, reposicionando em 2 minutos, o mesmo processo repetiu-se 5 vezes em cada tipo do solo analisado. Adotou se como simulação de chuva não permanente, o evento de chuva durante 2 minutos, controlando o volume de recarga no recipiente, e estabilizou-se água no sistema durante 10 minutos de modo a obter mesma altura de água, medida com a sonda elétrica, após a estabilização, simulou-se a descarga durante 10 segundos e coletou-se a água descarregada com a proveta de 2 litros, e reposicionou se durante 10 minutos, o mesmo procedimento foi repetido 5 vezes para cada tipo de solo.

Estas simulações foram feitas durante 2 dias para cada tipo do solo sendo uma amostra coletada, o registo de dados foi feito a cada simulação. A posterior os dados foram digitalizados no Excel, onde foi feita a organização e conversões, determinação das alturas do lençol freático e espaçamento entre nas devidas equações.

### 3.3. Parâmetros hidráulicos

Os parâmetros hidráulicos foram determinados apos a simulação, onde coletou-se os volumes de descarga, tempo de descarga, altura do lençol freático, volume de recarga e tempo de recarga, em que a carga hidráulica do sistema foi de 168 cm e o volume dos solos foi de 19660,2 cm<sup>3</sup>,

após isso determinou se os parâmetros hidráulicos como, taxa de recarga, porosidade drenável e condutividade hidráulica. Taxa de descarga foi determinada a partir da razão entre o volume de água descarregado pelo tempo de descarga, conforme apresenta a equação 1.

A porosidade drenável como o limite máximo da capacidade de campo que necessita de drenagem (Vasconcelos *et al.*, 2017), um dos parâmetros hidráulicos que traz nos compreender a estrutura física do solo, foi obtida em função do rebaixamento do lençol freático e da lâmina contida neste rebaixamento, conforme apresenta a equação 4, onde o volume do solo foi de 19660,2 cm<sup>3</sup>, os volumes de água foram coletada durante a simulação.

A condutividade hidráulica foi determinando considerado como aparato de carga constante o sistema hidrológico feito, cujo a área da secção transversal vale 1404,3 cm<sup>2</sup>, com a altura do solo executado 14 cm, e o volume de descarga coletado a 2 minutos, a carga hidráulica era de 168 cm, assim os valores da condutividade hidráulica fora obtida com a equação 2 numa temperatura de 24°C, onde foi corrigida para uma temperatura de 20°C, com a equação 3.

### **3.3.1. Regime permanente**

As equações do regime permanente simularam um evento de chuva constante e a descarga constante, onde a distância da camada impermeável até a linha dos drenos no sistema foi de 3 cm, o raio do dreno foi de 1,5 cm, o perímetro molhado foi de 3,98 cm, o valor PI foi de 3.14, as alturas do lençol freático foi medida a cada simulação do evento, a recarga ou descarga foi determinado com o volume de descarga pelo tempo de descarga, a condutividade hidráulica foi determinada com a equação 2, assim foram determinados os espaçamentos entre os drenos, com as equações de Donnan (Eq 16), Hooghoudt( Eq 17), Donnan-Hooghoudt(Eq 18), Ernest (Eq 19) e Khirkhan (Eq 20), conforme apresenta a tabela 2.

### **3.3.1. Regime não permanente**

Nesse regime, os drenos não conseguem extrair a água da chuva enquanto ela ocorre (Albuquerque *et al.*, 1990). Uma chuva forte eleva a altura do lençol freático, obrigando o dreno a rebaixar, de modo a habilitar espaço para o próximo evento de chuva, (Tavares *et al.*, 2018a). O sistema adotado neste estudo, admitem o dreno a 3 cm acima da camada impermeável, podendo ser desprezível para equações que admitem o dreno localizado na camada impermeável, a capacidade de recarga diferente da capacidade de recarga, porosidade drenável e condutividade hidráulica determinada pela equação 4 e 2, as alturas do lençol freático foram determinadas durante a simulação do rebaixamento, o tempo de descarga foi de 10 segundos. Assim foram determinado as alturas do lençol freático após o rebaixamento com as

equações de Glover-Dumm (Eq 21), Boussinesq-Glover (Eq 22), Skilfgardee (Eq 23), Terzidis (Eq 24), Hammad (Eq 25), Kirkham (Eq 26) e Glover (Eq 27) de acordo com a tabela 3.

#### **3.4. Avaliação do desempenho de equações de drenagem agrícola.**

A eficiência das equações não permanentes observou se com o teste de desvio quadrado medio (DQM), conforme indica a equação 27, sugerido por Sousa *et al.* (2015), na qual foi apresentada a eficiência pelos gráficos da redução do lençol freático em função do tempo de descarga, mostrando a aproximação dos valores experimentais e modelares. (Tavares *et al.*, 2018).

A avaliação das equações permanentes fez-se com Análise de variância (ANOVA\*), com o teste de Tukey há 5 % de significância dos valores médios dos desvios, onde a precisão da eficiência foi estabelecida com a comparação do valor experimental e modelar na qual a diferença não tem de ser superior a 0,10 m, para que possa ser considerado modelo eficiente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Parâmetros hidráulicos dos solos

A drenagem agrícola subterrânea, considera como parâmetros hidráulicos principais do solo, a condutividade hidráulica e a porosidade drenável ((Albuquerque *et al.*, 1990a), em que nos solos do Regadio de Chókwè a condutividade hidráulica compreendem valores médios de 1,82 cm/h para solos de Matuba, 1,83 cm/h para solos de Lionde, 3,01 cm/h em solos e Xilembene. A porosidade drenável dos solos resulta nos valores médios de 0,089 (8,9%) em Matuba, 0,077 (7,7 %) em Lionde e 0,063 (6,3%) em solos de Xilembene. As simulações hidrológicas feitas em 6 dias, indicam que a altura média do lençol freático estabiliza em 11,475 cm (Matuba), 5,5149 cm (Lionde) e 17,5139 cm (Xilembene), em relação a profundidade da caixa, assim as recargas compreendiam valores médios de 0,868 m/dia em Matuba, 0,876 m/dia em Lionde e 1,43 m/dia para Xilembene.

O Ferreira *et al.*, (2022), avaliando a condutividade hidráulica em Latossolo de diferentes usos e manejo agrícola nas profundidade de 0 a 0,10m e de 0,10 a 0,20m, classifica a condutividade hidráulica em muito lenta ( $<0,1 \text{ cm h}^{-1}$ ), lenta ( $0,1 \text{ a } 0,5 \text{ cm h}^{-1}$ ), moderadamente lenta  $0,6 \text{ a } 2 \text{ cm h}^{-1}$ ), moderada ( $2,10 \text{ a } 6,00 \text{ cm h}^{-1}$ ), moderadamente rápida ( $6,10 \text{ a } 12,00 \text{ cm h}^{-1}$ ), rápida ( $12,10 \text{ a } 18,00 \text{ cm h}^{-1}$ ) e muito rápida ( $>18,10 \text{ cm h}^{-1}$ ), concordando com as classificações estabelecidas, por tratar de solos agrícolas, e as profundidades incluso no estudo presente.

Usando a classificação de Ferreira *et al.*, (2022), pode-se observar que os solos de Matuba e Lionde possui condutividade hidráulica moderadamente lenta, e os de Xilembene pertence à classe moderada, assegurando a hipótese de os solos serem superficiais, também por serem coletados até 30 cm da profundidade das áreas de produção agrícola, onde são efetuadas as lavouras e a produção de diferentes tipos de culturas. O Ferreira *et al.*,(2022) assegura que a produção de culturas leguminosas cujo o sistema radicular mais profundo, indicia o aumento de bióporos e matéria orgânica, reduzindo a densidade do solo e a porosidade total, aumentando conseqüentemente a condutividade hidráulica em profundidade. O Silva *et al.*(2022), assegura que a pratica de diferentes espécies de cobertura, que explorem o volume máximo de solo, permite a quebra das camadas subsuperficiais do solo, as quais são poucos permeáveis em abundancia, por movimentação de maquinarias, o tipo de mineral geológico presente em horizonte, e os implementos agrícolas. As espécies de cobertura de solos, cujos as raízes exploram diferentes profundidade são usados para mitigar o efeito negativo de compactação do solo, por reduzir a densidade e aumentar a porosidade (Ruffato *et al.*, 2019).

Ferreira *et al.*, (2022), no seu estudo de condutividade hidráulica em Latossolo obtiveram valores entre 2,84 a 9,87 cm/h na profundidade de 0 a 0,10 m, e valores entre 4,11 a 10,94 cm/h, na profundidade de 0,10 a 0,20. Os valores obtidos no presente estudo, são inferiores, aos observados no estudo mencionado em todas as profundidades exceto nos solos de Xilembene (3,01 cm/h), que corresponde aos valores mínimos observados no estudo mencionado há profundidade de 0 a 0,10m. O Silva *et al.*, (2021) avaliando a qualidade física de um Neossolo Regolítico sob sistema de Integração Lavoura-Pecuária, obtiveram valores de condutividade hidráulica variando de 6,92 a 40,63 cm h<sup>-1</sup> na camada de 0 a 0,10 m, cujos os tratamentos obedecem a Pastagem com capim Massai e Floresta enquanto na profundidade de 0,10 a 0,20 m os valores oscilavam de 5,49 a 22,46 cm h<sup>-1</sup> nos tratamentos de Milho solteiro e Floresta, sendo valores altos aos observados no presente estudo.

Rocha *et al.*, (2019). estudando variação espacial da condutividade hidráulica saturada em uma bacia hidrográfica de recarga do Sistema Aquífero Guaran, do solo em diferentes profundidades obteve valores entre 1,01 a 9,53 cm h<sup>-1</sup>, sendo intervalo que contém os valores obtidos no presente estudo, ainda determinados em diferentes metodologias, trazendo credibilidade aos valores obtidos no presente estudo. O Sales *et al.*, (2018), avaliando a qualidade física do solo sob sistema de integração agropecuária, notaram a redução da condutividade hidráulica a medida que a profundidade do solo aumente, suspeitando como causa a redução de actividade dos microrganismos na subsuperfície.

O Silva *et al.*, (1997), estabelece que um solo cujo a porosidade drenável varia entre 6 a 10 % terá propriedades como aeração, condutividade hidráulica e disponibilidade de água, ótimas para o desenvolvimento vegetativo. E ainda, quando seu valor e menor que 3%, a drenagem torna-se difícil. Para valores de 16 a 18 %, a aeração e a condutividade hidráulica são satisfatórias, porem a umidade disponível no solo é baixa. Assim os solos observados neste estudo encaixam-se na escala de ótimas condições de aeração, condutividade hidráulica, e disponibilidade de água, para o desenvolvimento vegetativo. Ainda usando Timberlake *et al.*,(1986) fazendo levantamento das pastagens e solos, classifica os solos de Matuba as de textura franca arenosa, Lionde franca argilosa e Xilembene Argilo-Arenosa, o que justifica a porosidade observada nestes solos, podendo se notar que a medida que evolui-se de Matuba a Xilembene os solos tendem a ser pesados. Filho *et al.*, (2019), analisando a porosidade em função de solos com diferentes classes textura, observou que o solo argiloso registrou microporosidade em 80% da porosidade total, comparado ao arenoso (47%). A dinâmica de retenção de água no solo está diretamente ligada a microporosidade do solo e é influenciada

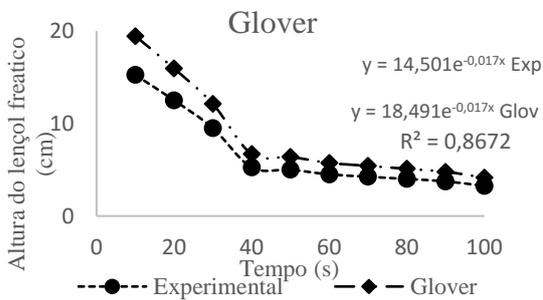
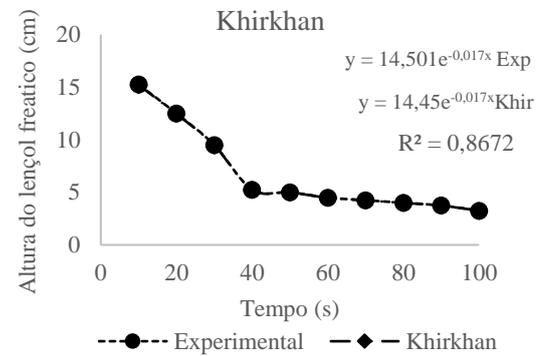
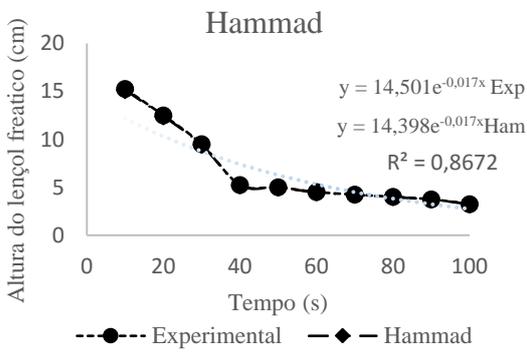
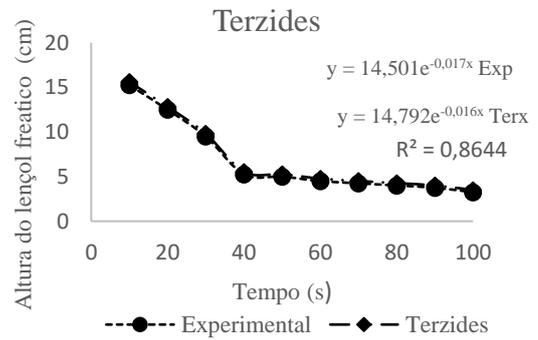
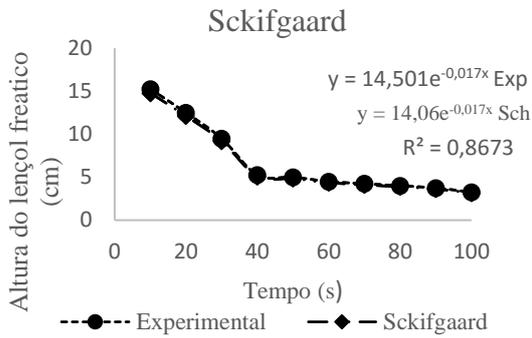
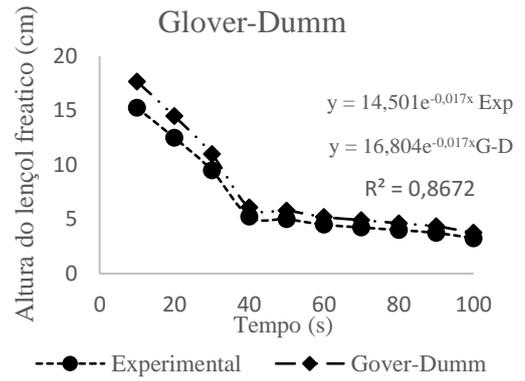
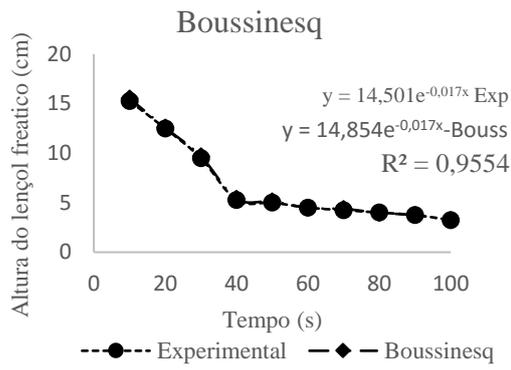
diretamente pela textura do solo, uma vez que o solo de textura argilosa apresentou maior facilidade na formação de micróporos quando comparados a solos de textura arenosa, o fenômeno é válido e observado neste estudo por obter ótimos valores da porosidade drenável à capacidade de retenção de água.

Barros *et al.*, (2016), analisando a distribuição da porosidade estrutural e textural em solos de terra preta arqueológica, localizadas nos municípios de Melgaço, dentro da Floresta Nacional de Caxiuanã. Observa valores 18% no solo1 (franca arenosa), 13% no solo 2 (franca), 15% no solo 3 (franca argilosa arenosa), 11% no solo 4 (franca arenosa), sendo valores superiores aos observados nestes estudos. Queiroz *et al.*, (1995), trabalhando na estimativa de porosidade drenável de uma solo várzea a partir da tenção de mesa, obteve um valor de 17.12% que é ligeiramente maior aos valores obtidos neste estudo.

## **4.2. Avaliação das equações**

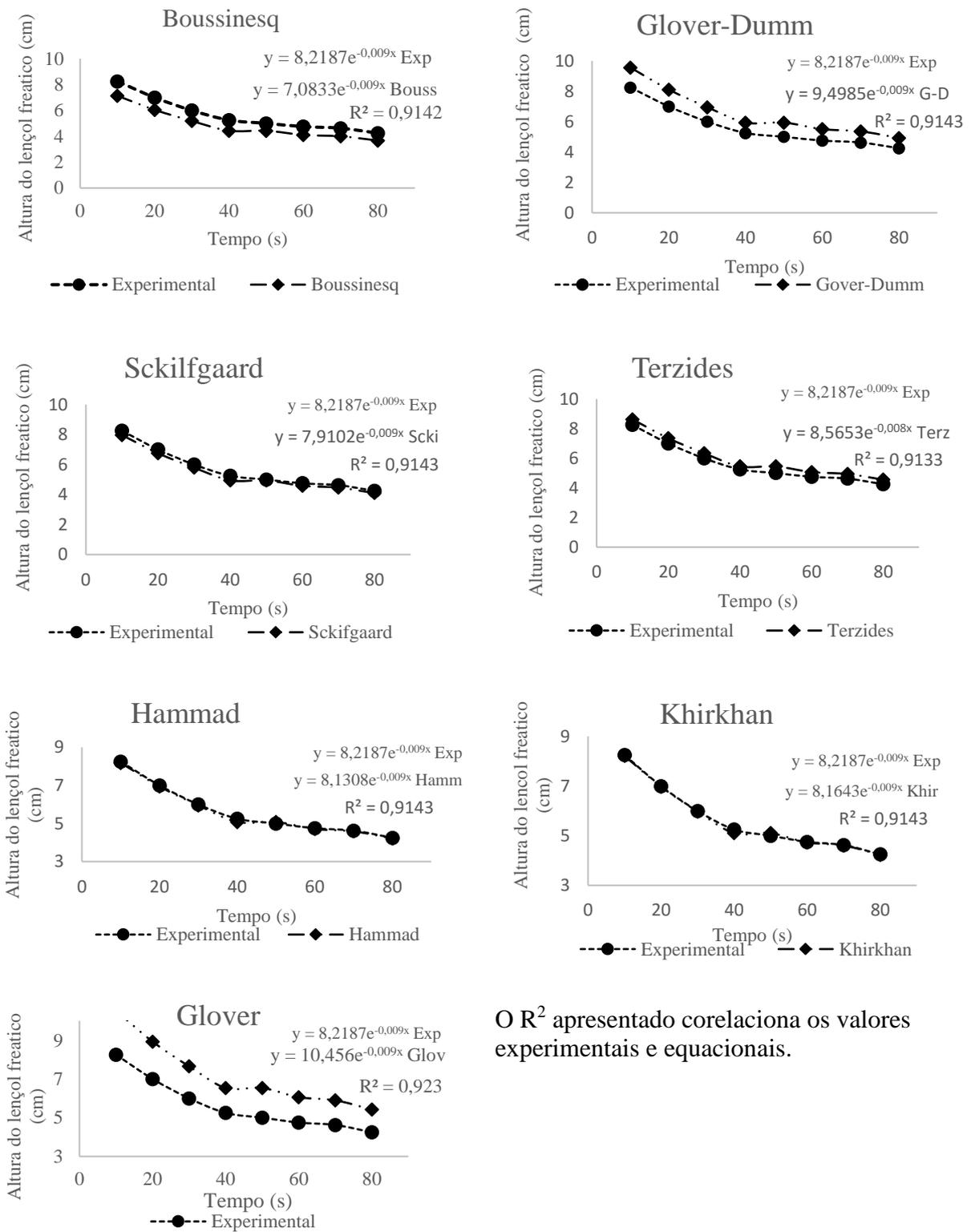
### **4.2.1. Regime não permanente**

A performance dos modelos não permanentes avaliados nos solos de Matuba, Lionde e Xilembene apresenta diversidade da eficiência, na qual a eficácia dos modelos varia em cada solo a figura 10,11 e 12 ilustra a redução do lençol freático pelos dados obtidos no experimento com os determinados pelas equações.



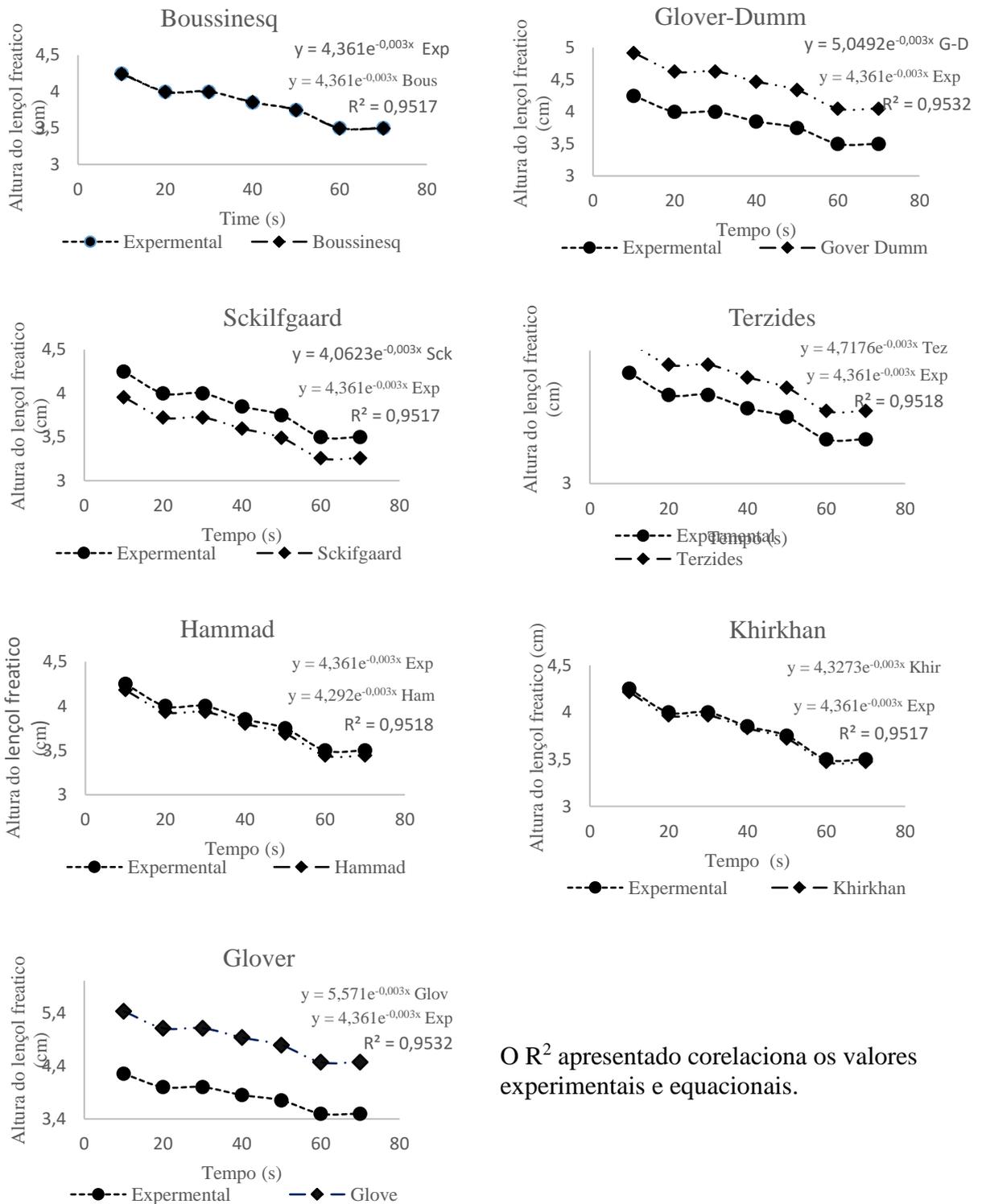
O  $R^2$  apresentado correlaciona os valores experimentais e equacionais.

**Figura 10:** Variação da altura do lençol freático nas equações não permanente em solos de Matuba



O  $R^2$  apresentado correlaciona os valores experimentais e equacionais.

**Figura 11:** Variação da altura do lençol freático nas equações não permanente em solos de Lionde



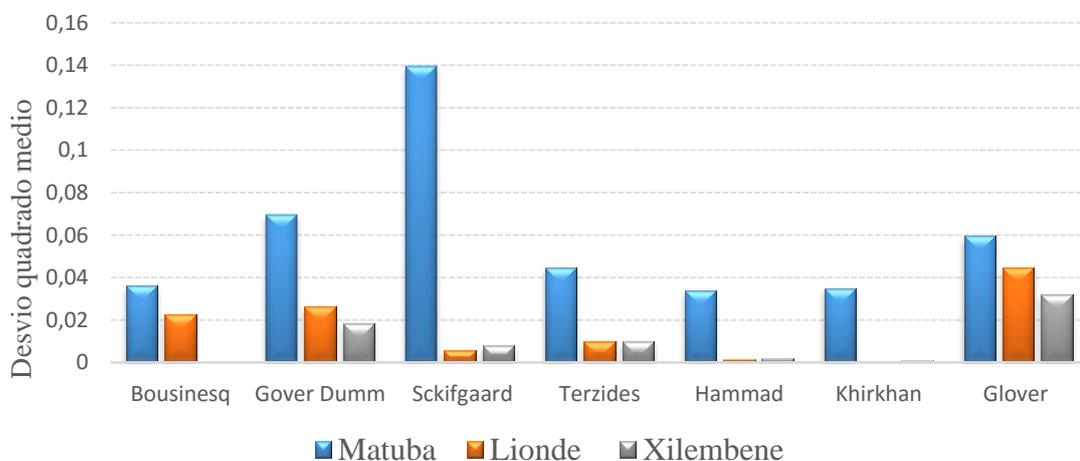
O  $R^2$  apresentado correlaciona os valores experimentais e equacionais.

**Figura 12:** Variação da altura do lençol freático nas equações não permanente em solos de Xilembene

A Figura 10 apresenta redução do lençol freático em solos de Matuba, estabilizado a 15 cm de profundidade partindo de camada impermeável, observa-se que os valores obtidos pelos modelos de Khirkhan, Hammad, Boussinesq-Glover, e Sckilfgardee tendem se alinhar aos valores experimentais alistando se aos modelos eficientes, e os restantes modelos tendem se distanciar dos valores experimentais tornando-os ineficientes.

A Figura 11, apresenta a redução do lençol freático nos solos de Lionde, estabilizado a 9 cm de profundidade partindo da camada impermeável, observa se que os valores obtidos pelos modelos de Khirkhan, Hammad e Sckilfgardee, tendem se alinhar aos valores experimentais tornando-os eficientes, e os restantes modelos tendem a se distanciar dos valores experimentais tornando os ineficientes. A Figura 12, apresenta a redução do lençol freático em solos de Xilembene, estabilizado há 4,5 cm de profundidade a partir da camada impermeável, observa se que os valores obtidos pelos modelos Boussinesq-Glover, Khirkhan e Hammad alinha-se aos valores experimentais tornando -se eficientes, enquanto que os restantes modelos tendem a se distanciar tornando-os ineficientes.

A precisão na avaliação das equações do fluxo não permanente, foi feita com o teste de desvio medio quadrado, que opera propondo a eficiência do modelo a medida que o valor do desvio for menor possível. Assim a Fig 13, apresenta o índice de desvio quadrado media das equações e a tabela 6 apresenta a ordem decrescente da eficiência das equações.



**Figura 13:** Gráfico de análise de desvio quadrado médio das equações não permanentes

Observa-se neste gráfico a diversidade da eficiência dos modelos, em que nos solos de Matuba a equação de Hammad se desvia menos tornando se mais eficiente, e a equação de Sckilfgardee se desvia mais tornando se menos eficiente. Nos solos de Lionde a equação de Khirkhan se desvia menos tornando se mais eficiente, e a equação de Glover se desvia mais tornando se menos eficiente. Nos solos de Xilembene a equação de Boussinesq-Glover se desvia menos tornando se mais eficiente, e a equação de Glover se desvia mais tornando se menos eficiente, ainda a tabela 6 detalha a classificação dos modelos, partindo dos mais eficientes ao menos eficientes.

**Tabela 4:** Ordem crescente da eficiência das equações no fluxo não permanente.

<b>SOLOS</b>			
<b>Ordem</b>	<b>Matuba</b>	<b>Lionde</b>	<b>Xilembene</b>
<i>1<sup>o</sup></i>	Hammad	Khirkhan	Boussinesq-Glover
<i>2<sup>o</sup></i>	Khirkhan	Hammad	Khirkhan
<i>3<sup>o</sup></i>	Boussinesq-Glover	Sckilfgardee	Hammad
<i>4<sup>o</sup></i>	Terzides	Terzides	Sckilfgardee
<i>5<sup>o</sup></i>	Glover	Boussinesq-Glover	Terzides
<i>6<sup>o</sup></i>	Glover-Dumm	Glover-Dumm	Glover-Dumm
<i>7<sup>o</sup></i>	Sckilfgardee	Glover	Glover

Em relação aos solos a equação de Hammad é eficiente em primeiro lugar nos solos de Matuba, segundo lugar nos solos de Lionde e terceiro lugar nos solos de Xilembene, sendo sugerida para calculo de espaçamento entre os drenos, em todos os solos avaliados, por apresentar variações ligeiramente menores, Tavares *et al.*, (2018b), trabalhando com as mesmas avaliações usando o teste de desvio medio quadrado, nas condições em que o dreno se localiza pouco acima da camada impermeável, observa a mesma eficiência da equação, assegurando os resultados obtidos neste estudo. Duarte *et al.*, (2001c) trabalhando com as mesmas avaliações, observa a

ineficácia do modelo, quando o dreno localiza-se na camada impermeável e pouco acima da camada impermeável, o que pode ser causado pela estrutura física do solo.

A equação de Khirkhan é eficiente em segundo lugar em solos de Matuba e Xilembene, primeiro lugar em Lionde, podendo ser aplicado no dimensionamento de drenos em todos os solos, quando se respeitar as condições em que o dreno situa-se pouco acima da camada impermeável, com o intuito de reduzir a altura do lençol freático, O Tavares *et al.*, (2018b) nas suas avaliações, observa a eficiência desta equação, quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, assegurando os resultados obtidos neste estudo, ao contrário do Duarte *et al.*, (2001c), trabalhando com as mesmas avaliações, observa a ineficiência do modelo, quando o dreno localiza-se na camada impermeável e pouco acima da camada impermeável, podendo ser causado pela estrutura física do solo em análise.

A equação de Boussinesq-Glover é eficiente em terceiro lugar nos solos de Matuba, quinto lugar nos solos de Lionde e primeiro lugar nos solos de Xilembene, sugerindo sua aplicação em qualquer escala para solos de Xilembene e Matuba, enquanto em Lionde pode ser aplicado áreas reduzidas de modo a evitar o subdimensionamento de espaçamento entre os drenos, que causaria a ineficiência do sistema de drenagem, Tavares *et al.*, (2018b), no seu estudo observa a eficiência deste modelo, em condições do dreno localizado na camada impermeável, assegurando os resultados obtidos nos solos de Matuba e Xilembene, Duarte *et al.*, (2001c), observa a ineficiência deste modelo, quando o dreno situa-se pouco acima da camada impermeável, coincidindo com os resultados obtidos nos solos de Lionde, podendo ser causado pela estrutura física do solo e a localização do dreno.

A equação do Terzides é melhor em quarto lugar nos solos de Matuba e Lionde, quinto lugar em Xilembene, podendo ser aplicado em áreas reduzidas em todos os solos, de modo a evitar a superestimação do espaçamento entre os drenos, o que reduziria a eficiência do sistema de drenagem, (Tavares *et al.*, 2018b), observa a ineficiência nesta equação quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, assegurando os resultados obtidos neste estudo, Duarte *et al.*, (2001c), trabalhando com as mesmas avaliações, observa a ineficiência do modelo quando o dreno localiza-se na camada impermeável e pouco acima da camada impermeável, o que vai de acordo com os resultados obtidos neste estudo, suspeitando a posição dos drenos, talvez alocando próximo a superfície pode-se observar resultados diferentes.

A equação de Glover é a quinta melhor nos solos de Matuba e a sétima melhor em Lionde e Xilembene, este modelo tende a ser ineficiente, em todos os solos, quando o dreno localiza-se

pouco acima da camada impermeável, podendo ser aplicadas escaladas reduzidas, o Duarte *et al.*, (2001c), avaliando as equações, observa a ineficiência do modelo quando o dreno localiza-se na camada impermeável e pouco acima da camada impermeável, o que coincide com os resultados obtidos neste estudo tornando-os credíveis, ainda o mesmo foi observado por Tavares *et al.*, (2018b), na avaliação das equações. Loureiro *et al.* (2015), no seu estudo observou a eficiência neste modelo, diferindo dos resultados obtidos no presente estudo, suspeitando como causa, a estrutura física do solo, e a posição do dreno.

A equação de Glover-Dumm é a sexta melhor nos solos de Matuba e sétima melhor nos solos Lionde e Xilembene, o modelo tende a ser ineficiente em todos os solos analisados, quando o dreno localiza se pouco acima da camada impermeável, Tavares *et al.*, (2018b), observou mesma ineficácia do modelo no seu estudo quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, tornando os resultados obtidos neste estudo credível, ao contrario de Duarte *et al.*, (2001c), no seu estudo observa a eficiência deste modelo, quando o dreno se localiza pouco acima da camada impermeável, contrariando os resultados obtidos neste estudo, o Pinto *et al.* (2015), no seu estudo de modelo aplicado no dimensionamento de drenos subterrâneos para época de irrigação, sugere que o modelo de Glover-Dumm pode ser aplicado quando se respeite as recomendações estabelecidas, o Darzi-Naftchali *et al.*(2014), trabalhando com arrazoes da Irlanda, observa a mesma eficiência deste modelo, contrariando os resultados obtidos neste estudo, podendo ser causado pela posição dos drenos, talvez quando alocados próximo a superfície, pode se observar, resultados diferentes.

A equação de Skilfgardee e a sétima melhor nos solos de Matuba, terceira nos solos de Lionde e quarta nos solos de Xilembene, este modelo é ineficaz em solos de Matuba e Xilembene, eficiente nos solos de Lionde, quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, podendo ser aplicado no dimensionamento de drenos em solos de Lionde, ao contrario em solos de Matuba e Xilembene que só pode ser aplica em áreas reduzidas, para evitar a superestimação do espaçamento entre os drenos, reduzindo a eficiência do sistema, o Duarte *et al.* (2001), no seu estudo, observa a eficiência do modelo quando o dreno localiza pouco acima da camada impermeável, o que se assemelha aos valores obtidos nos solos de Lionde neste estudo, e ao contrario dos valores obtidos nos solos de Matuba e Xilembene, podendo ser causado pela estrutura física do solo que varia. O Loureiro *et al.* (2015), no seu estudo observa a eficiência desta equação quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, assegurando ainda os valores obtidos nos solos de Lionde, Tavares *et al.* (2018), observa a ineficiência desta

equação quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, o que se assemelha aos valores observado nos solos de Matuba e Xilembene.

Nota se que o valor máximo do desvio quadrado medio das equações é de 0,14 que é ligeiramente menor, podendo ser aplicados todos modelos avaliados neste estudo, conforme sugere Tavares *et al.* (2018).

#### 4.2.2. Regime Permanente

Na simulação permanente, foram avaliados os modelos de Donnan, Hooghoudt, Kirkham, Ernest, e a modificação de Donnan-Hooghoudt, a precisão das equações permanente foi organizada pelo método de Análise de variância (ANOVA\*), com o teste de Tukey há 5 % de significância, dos valores médios dos desvios, onde a sentença foi estabelecido, pela comparação do valor experimental e modelar na qual a diferença não deve ultrapassar 0,10 m, para que possa ser considerado modelo eficiente.

**Tabela 5:** Teste de Tukey para comparação de médias para o espaçamento entre drenos predito pelos modelos avaliados.

MODELOS	SOLOS		
	Matuba (p <0.162)	Lionde (p <0.051)	Xilembene (p <0.014)
Donnan	1.30 <sup>a</sup>	1.05 a	1.415b
Hooghoudt	1.45 <sup>a</sup>	1.23ab	0.575 a
Donnan-Hooghoudt	1.45 <sup>a</sup>	1.42ab	1.42ab
Ernest	1.50 <sup>a</sup>	1.512ab	1.46b
Khirkhan	2.26 <sup>a</sup>	2.167b	1.67b
Experimental		1,34 (m)	

As médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem significativamente ao nível de 5% pelo teste de Tukey.

Na tabela acima, pode se observar que, nos solos de Matuba, não há diferença significativa entre os modelos avaliados (p<0.1622), tendo a equação de Donnan com o valor mínimo, e a equação de Khirkhan com o valor máximo. Nos solos de Lionde existem diferencia significativa nas médias das equações, em que a equação de Donnan e Khirkhan diferem entre si, e se assemelham aos demais modelos. Nos solos de Xilembene também existe uma diferencia significativa entre as equações, onde o modelo de Hooghoudt e Khirkhan diferem entre se, o

modelo de Hooghoudt e Donnan-Hooghoudt assemelham se, e o modelo de Khirkhan assemelha-se ao de Ernest, Donnan-Hooghoudt e Donnan. Assim a eficiência do modelo será notada quando o espaçamento obtido experimentalmente for próximo ao observado pelo modelo, admitindo o intervalo de 0,10 metros de diferença, conforme sugere Tavares *et al.* (2018). Podendo ser observado desta forma:

O modelo de Donnan é eficiente nos solos de Matuba e Xilembene, e ineficaz nos solos de Lionde, quando o dreno localiza pouco acima da camada impermeável, podendo ser aplicado no sistema de drenagem em solos de Matuba e Xilembene, e não aconselhável nos solos de Lionde, pois podem subestimar ou superestimar o espaçamento entre os drenos reduzindo a eficiência dos sistemas. O Tavares *et al.* (2018), no seu estudo observa a eficiência neste modelo, quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, o que vai de acordo com os resultados obtidos neste estudo nos solos de Matuba e Xilembene, ao contrário dos resultados obtidos nos solos de Lionde, podendo ser causado pela estrutura física do solo, posição do dreno que aloca-se a 3 cm da camada impermeável.

O modelo de Hooghoudt é ineficiente em todos os solos analisados neste estudo, quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, não sendo sugerido na aplicação do modelo para dimensionamento de drenos, pois pode causar a ineficiência do sistema de drenagem. O Amorim, (1995), no seu estudo observa a eficiência nesta equação, contrariando os resultados obtidos neste estudo, em todos os solos avaliados. O Albuquerque *et al.*, (1990a), no seu estudo observa a ineficiência deste modelo quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, indo de acordo com os resultados neste estudo em todos os solos avaliados.

O modelo de Donnan-Hooghoudt, é eficiente em solos de Lionde e Xilembene, e ineficiente nos solos de Matuba, quando o dreno se localiza pouco acima da camada impermeável, podendo ser aplicado no dimensionamento de sistemas nos solos de Lionde e Xilembene, e não sendo recomendado em solos de Matuba, quando o solo for homogêneo até a camada impermeável. O Loureiro *et al.*(2015), no seu estudo observa a mesma eficiência, quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, sustentando os resultados observados neste estudo em solos de Lionde e Xilembene, contrariando os resultados obtidos nos solos de Matuba, podendo ser causado pela estrutura física dos solos. O Albuquerque *et al.*,(1990), trabalhando com as mesmas avaliações, observa a eficiência do modelo, quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, assegurando os resultados obtidos neste estudo nos solos de Lionde e Xilembene, e contrariando os resultados obtidos nos solos de Matuba.

O modelo de Ernest é ineficiente em todos os solos avaliados neste estudo, quando o dreno se localiza pouco acima da camada impermeável, não sendo recomendado para aplicação dimensionamento de drenos, nos solos do regadio de chókwe. O Amorim, (1995), no seu estudo observa a mesma ineficiência, quando os drenos localiza-se pouco acima da camada impermeável, suspeitando a homogeneidade do solo analisado. O Tavares *et al.*(2018), no seu estudo observa a eficiência a do modelo, contrariando os resultados obtidos nestes estudo, podendo ser causado pela estrutura física do solo.

O modelo de Khirkhan é ineficaz em todos os solos avaliados, quando o dreno se localiza pouco acima da camada impermeável, não sendo recomendado para o dimensionamento de sistema de drenagem, no regadio de chókwe. O Loureiro *et al.*(2015), observa a mesma ineficácia do modelo quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, assegurando os resultados obtidos neste estudo em todos os solos avaliados. O Tavares *et al.*(2018), no seu estudo observa a mesma ineficiência deste modelo quando o dreno localiza-se pouco acima da camada impermeável, assegurando a os resultados obtidos neste estudo. O Albuquerque *et al.*,(1990), no seu estudo, também observa a ineficiência deste modelo, na camada impermeável e pouco acima da camada impermeável, indo de acordo com os resultados obtidos neste estudo, portanto o modelo é ineficiente em todos os solos avaliados talvez pela posição do dreno, podendo-se obter resultados diferentes quando modificado para próximo da superfície.

## **5. CONCLUSÃO**

1. Conclui-se que as propriedades hidráulicas obtidas no estudo indicam, que os solos possuem uma ótima estrutura, para potencializar as produções.
2. No regime não permanente todas as equações observadas podem ser aplicadas para o dimensionamento de sistemas de drenagem em todos os solos, recomendando em primeiro lugar a aplicação da equação de Hammad em Matuba, Khirkhan em Lionde e Boussinesq-Glover em Xilembene, por obter valores de desvios médios menores e por obter valores de níveis freáticos alinhados aos experimentais.
3. No regime permanentes, torna-se eficiente o modelo de Donnan para solos de Matuba, o modelo de Donnan-Hooghoudt em solos de Lionde e os modelos de Donnan e Donnan-Hooghoudt em solos de Xilembene. Os restantes modelos são ineficientes por subestimar ou superestimar o espaçamento entre os drenos, em que com a sua aplicação podem causar o aumento ou a redução de número de drenos, acarretando custos de implementação do projeto e afetando na eficiência do projeto.

## **Recomendações**

Recomenda-se repetir o mesmo estudo, ate as profundidades de 1.5, para compreendermos a estrutura física dos solos e a aplicabilidade das equações nestas profundidades, conforme sugere o Duarte *et al.* (2001) que um bom sistema de drenagem tem de ter a profundidade de instalação entre os drenos, entre 1,2 a 1,5 metros.

## 6. REFERÊNCIAS

- Abduljaleel, Yasir, Ahmed Awad, Nadhir Al-Ansari, Ali Salem, Abdelazim Negm, e Mohamed Elsayed Gabr. «Assessment of Subsurface Drainage Strategies Using DRAINMOD Model for Sustainable Agriculture: A Review». *Sustainability* 15, n.º 2 (janeiro de 2023): 1355. <https://doi.org/10.3390/su15021355>.
- Albuquerque, Paulo Emílio Pereira de, Paulo Afonso Ferreira, Blanor Torres Loureiro, e Salassier Bernardo. «Validade de algumas equações de drenagem para espaçamento de drenos cobertos. I. Regime de escoamento permanente.» *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 25, n.º 3 (1990): 353–63. <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/13415>.
- Amorim, Valdiney Bezerra de. «Diagnóstico e avaliação de desempenho de drenagem subterrânea no perímetro irrigado de Bebedouro-PE.», 1 de junho de 1995. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3210>.
- Andrade, Antonio, Ivan Guerrini, Marcio Maggi, e Wagner Vilella. «Determinação a campo da porosidade drenável utilizando modelos matemáticos com base no fluxo de drenagem». *IRRIGA* 9 (18 de junho de 2018): 106. <https://doi.org/10.15809/irriga.2004v9n2p106-114>.
- Argunhan-Atalay, Cidem, Hasan Yazicigil, e Mehmet Ekmekci. «Assessment of Performance of Horizontal Drains in an Open Pit Mine in Eastern Turkey». *Environmental Earth Sciences* 80, n.º 3 (31 de janeiro de 2021): 108. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09402-2>.
- Barcelo, Vinucius. «Cap 14 - Cálculos de Espaçamento Entre Drenos e Dimensionamento de Drenos Subterrâneos | PDF | Drenagem | Irrigação». Scribd, 27 de outubro de 2021. <https://pt.scribd.com/document/535510693/Cap-14-Calculos-de-espacamento-entre-drenos-e-dimensionamento-de-drenos-subterraneos>.
- Barros, Katiane Raquel Mendes, Herdjanía Veras de Lima, Sueli Rodrigues, e Dirse Clara Kern. «Distribuição da porosidade textural e estrutural em solos de Terra Preta Arqueológica». *Revista Ciência Agronômica* 47 (dezembro de 2016): 609–15. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160073>.
- Batsilas, Ioannis, Anastasia Angelaki, e Iraklis Chalkidis. «Hydrodynamics of the Vadose Zone of a Layered Soil Column». *Water* 15, n.º 2 (janeiro de 2023): 221. <https://doi.org/10.3390/w15020221>.
- Bernardo, Salassier. «(PDF) Manual de Irrigação (8 ed) - Salassier Bernardo, Editora UFV | Eng Hayder - Academia.edu», 2008. [https://www.academia.edu/45657937/Manual\\_de\\_Irriga%C3%A7%C3%A3o\\_8\\_ed\\_Salassier\\_Bernardo\\_Editora\\_UFV](https://www.academia.edu/45657937/Manual_de_Irriga%C3%A7%C3%A3o_8_ed_Salassier_Bernardo_Editora_UFV).
- Boico, Vinicius F., René Therrien, Hugo Delottier, Nathan L. Young, e Anker L. Højberg. «Comparing Alternative Conceptual Models for Tile Drains and Soil Heterogeneity for the Simulation of Tile Drainage in Agricultural Catchments». *Journal of Hydrology* 612 (1 de setembro de 2022): 128120. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128120>.
- Correia, Fabio Veríssimo, Tomaz Langenbach, e Tácio Mauro Campos. «Avaliação do transporte de atrazina em solos sob diferentes condições de manejo agrícola». *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34 (abril de 2010): 525–34. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200026>.

- Cunha, Luciana de Pinho, e Sérgio Oliveira Moraes. «Avaliação do regime estacionário em colunas de amostras deformadas de solo sob saturação». *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31 (outubro de 2007): 1197–1203. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500035>.
- Camussi, Germán F., Silvia Imhoff, Diogenes L. Antille, e Roberto P. Marano. «Hydraulic performance of mole drains and validation of steady-state drainage spacing equations for Mollisols». *Soil and Tillage Research* 223 (1 de setembro de 2022): 105448. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105448>.
- Darzi-Naftchali, Abdullah, Seyed Mirlatifi, e Ahmad Asgari. «Comparison of steady- and unsteady-state drainage equations for determination of subsurface drain spacing in paddy fields: A case study in Northern Iran». *Paddy and Water Environment*, 29 de janeiro de 2014. <https://doi.org/10.1007/s10333-013-0364-4>.
- Duarte, Sérgio N., Décio E. Cruciani, Denis C. Cararo, Karina S. Passos, e Alexsandro D. V. Lopes. «Avaliação de equações de drenagem para regime não permanente em condições de laboratório». *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 5 (maio de 2001): 181–86. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000200001>.
- Ferreira, Eduardo, João Maia, Aloísio Bianchini, Bianca Vaz, e Pedro Kerkhoff. «Condutividade hidráulica de um Latossolo em diferentes sistemas de uso e manejo do solo». *Research, Society and Development* 11 (12 de dezembro de 2022): e384111638010. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38010>.
- Filho, Helio, Monikuelly Pereira, Karine Da, Silva Santos, Regiana Dos, Regiana Moura, e Francisco Oliveira. «Análise da porosidade em função de solos com diferentes classes texturais» volu especial (24 de janeiro de 2019): 75. [https://www.researchgate.net/publication/330599118\\_ANALISE\\_DA\\_POROSIDADE\\_EM\\_FUNCAO\\_DE\\_SOLOS\\_COM\\_DIFERENTES\\_CLASSES\\_TEXTURAI?\\_sg=U1dGeSHyKrGtl7bTc0DbmU9SP29WTZMK0lJy3Rnr2bBG3Zy4hMGCj7EkXlmidBRUK7iS1BjOg0jJNCO](https://www.researchgate.net/publication/330599118_ANALISE_DA_POROSIDADE_EM_FUNCAO_DE_SOLOS_COM_DIFERENTES_CLASSES_TEXTURAI?_sg=U1dGeSHyKrGtl7bTc0DbmU9SP29WTZMK0lJy3Rnr2bBG3Zy4hMGCj7EkXlmidBRUK7iS1BjOg0jJNCO).
- Gomes, Fernanda. «Conservação e Uso da Água na Agricultura em Moçambique: O Regadio do Chókwè – Vale do Rio Limpopo». Em *ResearchGate*, 1999. [https://www.researchgate.net/publication/306018788\\_Conservacao\\_e\\_Uso\\_da\\_Agua\\_na\\_Agricultura\\_em\\_Mocambique\\_O\\_Regadio\\_do\\_Chokwe\\_-\\_Vale\\_do\\_Rio\\_Limpopo](https://www.researchgate.net/publication/306018788_Conservacao_e_Uso_da_Agua_na_Agricultura_em_Mocambique_O_Regadio_do_Chokwe_-_Vale_do_Rio_Limpopo).
- Hulugalle, Nilantha R, Timothy B Weaver, e Lloyd A Finlay. «Drainage under Permanent Beds in a Furrow-Irrigated Vertisol» 4 (2010). <https://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/0213.pdf>.
- Lima, Geovani S. de, Reginaldo G. Nobre, Hans R. Gheyi, Lauriane A. dos A. Soares, Givanildo da S. Lourenço, e Saulo S. da Silva. «Aspectos de crescimento e produção da mamoneira irrigada com águas salinas e adubação nitrogenada». *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18 (junho de 2014): 615–22. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000600008>.
- Lopes, Manuela de Mesquita, Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, e Jorge Barbosa Soares. «Utilização dos testes estatísticos de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação», 2013. <https://doi.org/10.4237/transportes.v21i1.566>.
- Loureiro, Blanor Torres, Dário Andrade de Prata Filho, Paulo Afonso Ferreira, e Salassier Bernardo. «Validade de algumas equações de drenagem, para drenos abertos, em condições

- de laboratório». *Ceres* 37, n.º 214 (12 de fevereiro de 2015).  
<http://www.ceres.ufv.br/ojs/index.php/ceres/article/view/1997>.
- Miranda, Eugenio, Gilbenes Rosal, Rayane Furtado, e Tatiana Custódio. «Desenvolvimento de um algoritmo computacional para determinação do espaçamento entre drenos subterrâneos pelo método de Hooghout». *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 12 (28 de agosto de 2018): 2749–54. <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n400970>.
- Muma, Mushombe, Alain N. Rousseau, e Silvio J. Gumiere. «Modeling of subsurface agricultural drainage using two hydrological models with different conceptual approaches as well as dimensions and spatial scales». *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 42, n.º 1 (2 de janeiro de 2017): 38–53.  
<https://doi.org/10.1080/07011784.2016.1231014>.
- Pinto, Marinaldo, Dinara Alves, e Conan Salvador. «Modelo aplicado ao dimensionamento de drenos subterrâneos para época da irrigação». *IRRIGA* 1 (31 de agosto de 2015): 109.  
<https://doi.org/10.15809/irriga.2015v1n2p109>.
- Resende, Ronaldo S., Julio R. A. Amorim, Marcus A. S. Cruz, e Thais N. Meneses. «Distribuição espacial e lixiviação natural de sais em solos do Perímetro Irrigado Califórnia, em Sergipe». *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18 (maio de 2014): 46–52.  
<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18nsuppS46-S52>.
- Ribeiro, Kátia D., João M. S. do Nascimento, Natalino M. Gomes, Luiz A. Lima, e Stélio M. Menezes. «Relações matemáticas entre porosidade drenável e condutividade hidráulica do solo saturado». *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11 (dezembro de 2007): 600–606. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000600008>.
- Rocha, Rodrigo, Didier Gastmans, Marcelo Sacchi, e Marcelo Dias de Oliveira. «Variações espaciais na condutividade hidráulica do solo em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani». *Revista do Instituto Geológico* 40 (1 de outubro de 2019): 35–51.  
<https://doi.org/10.33958/revig.v40i2.646>.
- Ruffato, Guilherme, Deonir Secco, Luiz Junior, Luciene Tokura, Aracéli Marins, De Bruna, Amauri Ghellere Garcia Miranda, et al. «Structuring of a Haplortox by Cover Crops and Their Effects on the Yield of Soybean Grains». *Journal of Agricultural Science* 11 (15 de abril de 2019): 309. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n5p309>.
- Sales, Agust, Arystides Resende Silva, Carlos Alberto Costa Veloso, Eduardo Jorge Maklouf Carvalho, e Bárbara Maia Miranda. «Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na amazônia legal». *Colloquium Agrariae. ISSN: 1809-8215* 14, n.º 1 (4 de maio de 2018): 01–15. <https://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view/1989>.
- Sales, José Luciano, Raimundo Nonato Távora Costa, José Matias Filho, e Fernando Felipe Ferreyra Hernandez. «Análise de desempenho de um sistema de drenagem subterrânea na cultura da videira no município de jaguaruana - ceará». *IRRIGA* 9, n.º 2 (20 de agosto de 2004): 166–80. <https://doi.org/10.15809/irriga.2004v9n2p166-180>.
- Silveira, R.N.C.M., 2020. Drenagem e Controle de Salinidade na Irrigação.
- Silva, Éllen Lemes, Deonir Secco, Araceli Ciotti de Marins, Doglas Bassegio, e Mayra Beatriz Semiano Castro. «Características físicas do solo e rendimento de grãos de milho em função de culturas de cobertura». *Research, Society and Development* 11, n.º 1 (5 de janeiro de 2022): e21511124823–e21511124823. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24823>.

- Silva, Vicente, Vajapeyan Srinivasan, e Carlos A. V. de Azevedo. «Avaliação do desempenho de sistemas drenantes em condições de laboratório». Dissertação apresentada ao curso de mestrado em engenharia civil da universidade federal da paraíba em cumprimento as exigências para obtenção do grau de mestre em ciências (M .Sc.), 27 de maio de 1997. <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/6877/VICENTE%20DE%20PAULA%20SILVA%20-%20DISSERTA%C7%C3O%20PPGECA%201997.pdf?sequence=3>.
- Silva, Pedro, Flávio Oliveira, Walter Pereira, Adriana Martins, André Amaral, Danillo Tavares, e Alison Silva. «Qualidade física de solo arenoso em ambiente semiárido sob sistema de integração lavoura-pecuária». *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas* 15 (11 de dezembro de 2021): 598–616. <https://doi.org/10.18011/bioeng2021v15n4p598-616>.
- Sobrinho, Oswaldo Palma Lopes, e Francisco Lucivio Dos Santos. «Determinação da porosidade drenável em amostras de solos com e sem o uso de biofertilizantes», sem data, 5.
- Souza, Maria do C. P. de, Walter M. Rodrigues, e Sérgio L. A. Levien. «Equações obtidas a partir das leis de conservação para dimensionamento de drenos subterrâneos». *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18, n.º 12 (dezembro de 2014): 1201–8. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n12p1201-1208>.
- Sousa, F. C., J. J. A. Martins, A. P. T. Rocha, J. P. Gomes, T. Pessoa, e J. N. Martins. «Predição de modelos sobre a cinética de secagem de folhas de *Ziziphus joazeiro* Mart». *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais* 17 (junho de 2015): 195–200. [https://doi.org/10.1590/1983-084X/12\\_071](https://doi.org/10.1590/1983-084X/12_071).
- Souto, Antônio Gustavo de Luna, Lourival Ferreira Cavalcante, Antonio João de Lima Neto, Francisco de Oliveira Mesquita, e João Batista dos Santos. «Biometria em plantas de noni sob irrigação com águas salinas e lixiviação dos sais do solo». *Revista Ciência Agronômica* 47 (junho de 2016): 316–24. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160037>.
- Tavares, L. C. M., G. M. Araújo, F. F. L. dos Santos, A. P. F. Colares, A. F. Braga, e J. T. F. Rosas. «Avaliação de modelos de regime não permanente e permanente para cálculo do espaçamento entre drenos». *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas* 12, n.º 3 (30 de setembro de 2018): 248–56. <https://doi.org/10.18011/bioeng2018v12n3p248-256>.
- Trejo-Alonso, Josué, Sebastián Fuentes, Nami Morales-Durán, e Carlos Chávez. «Evaluation and Development of Pedotransfer Functions and Artificial Neural Networks to Saturation Moisture Content Estimation». *Water* 15, n.º 2 (janeiro de 2023): 220. <https://doi.org/10.3390/w15020220>.
- Timberlake, J., C. Jordao, e G. Serno. «levantamento\_de\_pastagens\_e\_solos\_de\_chokwè». Serie Terra e Agua, appen-wageningen\_university\_and\_research\_493455, 1986. <https://edepot.wur.nl/493455>.
- Vasconcelos, R. S., M. M. Pereira, H. Gondim Filho, R. S. Moura, J. A. Costa, e K. S. Santos. «Determinação da porosidade drenável em solos com diferentes classificações texturais». Em *Anais do IV Inovagri International Meeting - 2017*. Fortaleza, Ceará, Brasil: INOVAGRI/ESALQ-USP/ABID/UFRB/INCT-EI/INCTSa/INSTITUTO FUTURE, 2017. <https://doi.org/10.7127/iv-inovagri-meeting-2017-res3170784>.
- Verner, Marcos Vinícios Coelho, e Glauccio Luciano Araujo. «Condutividade hidráulica do solo saturado em função da proporção de areia em solos artificialmente compactados». *Anais do*

*Seminário Científico do UNIFACIG, n.º 3 (2017).*

<https://www.pensaracademico.unifacig.edu.br/index.php/semiariocientifico/article/view/517>

## 7. ANEXOS

**Tabela 6:** Regularização de furos de gotejadores no Tubo

<b>Número Furo</b>	<b>Tempo(s) Enchimento 1</b>	<b>Tempo(s) Enchimento 2</b>	<b>Volume</b>
1	66,54	78,31	300ml
2	73,6	100,83	300ml
3	67,3	78,85	300ml
4	77,3	45,28	300ml
5	78,08	96,57	300ml
6	43,35	56,64	300ml
7	72,65	91,84	300ml
8	56,09	77,61	300ml
9	45,95	75,59	300ml
10	77,69	104,5	300ml
11	57,05	76,72	300ml
12	55,74	65,36	300ml
13	59,28	96,56	300ml
14	53,89	72,2	300ml
15	42,68	50,79	300ml
16	54,24	63,03	300ml
17	45,56	50,46	300ml
18	43,26	56,43	300ml
19	48,35	82,25	300ml
20	61,2	86,13	300ml
21	71,27	94,8	300ml
22	46,54	72,91	300ml
23	74,3	90,14	300ml
<b>Media</b>	<b>53,55521739</b>	<b>76,68695652</b>	

## 7.2. Ensaio registo de dados;



**Figura 11:** Coleta de amostras dos solos na área de produção agrícola

**Tabela 7:** Variação de altura de lençol freático nos solos de Matuba

<b>SOLOS DE MATUBA EQUAÇÕES NÃO PERMANENTES</b>							
<b>EXPERIMENTAL</b>	<b>Simulação 1</b>						
	<b>Bousines q</b>	<b>Gover Dumm</b>	<b>Sckifgaard</b>	<b>Terzides</b>	<b>Hammad</b>	<b>Khirkhan</b>	<b>Glover</b>
<b>15,25</b>	15,2142	17,672	14,786	15,5897	15,1422	15,1959	19,4465
<b>9,5</b>	9,4861	11,0088	9,2109	9,8281	9,4328	9,4663	12,1142
<b>5,25</b>	5,2457	6,0838	5,0903	5,5351	5,2129	5,2314	6,6947
<b>5</b>	4,9961	5,7941	4,84	5,2801	4,9646	4,9823	6,3759
<b>4,25</b>	4,247	4,925	4,1207	4,5124	4,22	4,2349	5,4195
	<b>Simulação 2</b>						
<b>12,5</b>	12,759	14,4853	12,1197	12,8367	12,4116	12,4557	15,9397
<b>4,5</b>	4,4969	5,2147	4,3631	4,7688	4,4682	4,484	5,7383
<b>3,75</b>	3,7478	4,3456	3,6359	3,9977	3,7235	3,7367	4,7819
<b>4</b>	3,9975	4,6353	3,8783	4,2554	3,9717	3,9858	5,1007
<b>3,25</b>	3,2484	3,7662	3,1511	3,4804	3,227	3,2385	4,1443
<b>VARIAÇÃO DE ALTURA DO LENÇOL FREÁTICO EM CENTÍMETROS</b>							

**Tabela 8:** Espaçamento entre os drenos nos solos de Matuba

<b>Solos de Matuba</b>						
<b>Valores de espaçamentos entre os drenos nas equações Permanentes em metros</b>						
Experimental	Donnan	Hooghoudt	Donnan-Hooghoudt	Khirkhan	Ernest	
1,34	0,6	1,01	0,9	1,7	0,4	
	2	2,003	2	2,83	2,5	

**Tabela 9:** Variação de altura de lençol freático nos solos de Lionde

<b>SOLOS DE LIONDE</b>							
<b>EQUAÇÕES NÃO PERMANENTES</b>							
<b>EXPERIMENTAL</b>	<b>Simulação 1</b>						
	Boussinesq	Glover Dumm	Sckilfgardee	Terzides	Hammad	Khirkhan	Glover
<b>7</b>	6,0496	8,1105	6,7544	7,3576	6,9428	6,9713	8,9277
<b>5,25</b>	4,5372	6,0829	5,0658	5,5788	5,2071	5,2285	6,6958
<b>4,75</b>	4,1065	5,5035	4,5834	5,0669	4,7112	4,7305	6,0581
<b>4,25</b>	3,6746	4,9242	4,1009	4,5528	4,2153	4,2326	5,4204
	<b>Simulação 2</b>						
<b>8,25</b>	7,1286	9,5588	7,9606	8,6199	8,1826	8,2162	10,5219
<b>6</b>	5,1862	6,9518	5,7895	6,3432	5,951	5,9754	7,6523
<b>5</b>	4,3225	5,7932	4,8246	5,3231	4,9592	4,9795	6,3769
<b>4,625</b>	3,9985	5,3587	4,4627	4,9386	4,5872	4,6061	5,8986
<b>4,5</b>	3,8906	5,2139	4,3421	4,8101	4,4632	4,4816	5,392

**Tabela 10:** Espaçamento entre os drenos nos solos de Lionde

<b>Solos de Lionde</b>					
<b>Valores de espaçamentos entre os drenos nas equações Permanentes em metros</b>					
Experimental	Donnan	Hooghoudt	Donnam-Hoogodt	Khirkhan	Ernest
1,34	0,9	1,214	0,9	2,068	0,86
	1,205	1,81	1,94	2,266	1,59

**Tabela 11:** Variação de altura de lençol freático nos solos de Xilembene

EXPERIMENTAL	SIMULAÇÃO 1						
	Boussinesq	Glover Dumm	Sckilfgardee	Terzides	Hammad	Khirkhan	Glover
<b>4</b>	3,9943	4,6291	3,7243	4,3409	3,9349	3,9673	5,1075
<b>3,75</b>	3,745	4,3398	3,4915	4,0808	3,689	3,7193	4,7883
<b>3,5</b>	3,4956	4,0505	3,2587	3,8199	3,4431	3,4714	4,4691
<b>3,5</b>	3,4956	4,0505	3,2587	3,8199	3,4431	3,4714	4,4691
<b>4</b>	3,9943	4,6291	3,7243	4,3409	3,9349	3,9673	5,1075
	Simulação 2						
<b>4,25</b>	4,2436	4,9184	3,957	4,6001	4,1809	4,2152	5,4267
<b>4</b>	3,9943	4,6291	3,7243	4,3409	3,9349	3,9673	5,1075
<b>4</b>	3,9943	4,6291	3,7243	4,3409	3,9349	3,9673	5,1075
<b>3,875</b>	3,8696	4,4845	3,6079	4,211	3,812	3,8433	4,9479
<b>3,5</b>	3,4956	4,0505	3,2587	3,8199	3,4431	3,4714	4,4691

**Tabela 12:** Espaçamento entre os drenos nos solos de Xilembene

Solos de Xilembene					
Valores de espaçamentos entre os drenos nas equações Permanentes em metros					
Experimental	Donnan	Hooghoudt	Donnam-Hoogodt	Khirkhan	Ernest
1,34	1	1,23	0,9	1,52	0,25
	1,83	1,7	1,17	1,82	0,9