



UNIVERSIDADE
FEDERAL RURAL
DE PERNAMBUCO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA

BACHARELADO EM AGRONOMIA

Infiltração e redistribuição da água em solos irrigados por gotejamento: caracterização do avanço da frente de molhamento

ORIENTANDO: ERISON MARTINS AMARAL
ORIENTADOR: EDUARDO SOARES DE SOUZA

Serra Talhada-PE
Julho de 2019



UNIVERSIDADE
FEDERAL RURAL
DE PERNAMBUCO

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA
BACHARELADO EM AGRONOMIA**

Infiltração e redistribuição da água em solos irrigados por gotejamento: caracterização do avanço da frente de molhamento

Projeto de monografia apresentado como requisito básico para composição da avaliação do desempenho acadêmico do curso de bacharelado em agronomia, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), desenvolvido pelo discente Erison Martins Amaral, sob orientação do professor Eduardo Soares de Souza, para o semestre letivo 2019.1.

**ORIENTANDO: ERISON MARTINS AMARAL
ORIENTADOR: EDUARDO SOARES DE SOUZA**

Serra Talhada-PE
Julho de 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca da UAST, Serra Talhada - PE, Brasil.

A485i Amaral, Erison Martins

Infiltração e redistribuição da água em solos irrigados por gotejamento: caracterização do avanço da frente de molhamento / Erison Martins Amaral. – Serra Talhada, 2019.
46 f.: il.

Orientador: Eduardo Soares de Souza
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Unidade Acadêmica de Serra Talhada, 2019.

Inclui referências.

1. Irrigação. 2. Solos irrigados. 3. Infiltração. I. Souza, Eduardo Soares de, orient. II. Título.

CDD 630

ERISON MARTINS AMARAL

Infiltração e redistribuição da água em solos irrigados por gotejamento: caracterização do avanço da frente de molhamento

Projeto de monografia apresentado como requisito básico para composição da avaliação do desempenho acadêmico do curso de bacharelado em agronomia, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), desenvolvido pelo discente Erison Martins Amaral, sob orientação do professor Eduardo Soares de Souza, para o semestre letivo 2019.1.

Aprovado em: ____/____/____

Dr. Rodolfo Marcondes da Silva Souza (UFPE/DEN)

Prof. Me. Alan César Bezerra (UFRPE/UAST)

Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza (UFRPE/UAST)

Serra Talhada – PE
Julho de 2019

*[...] eternamente confiando em quem nós somos [...]
[...] a vida é nossa, nós a vivemos da nossa maneira [...]
[...] mente aberta para uma nova visão [...]
[...] e nada mais importa[...]*

Nothing else matters – Metallica

Agradecimentos

Bacharel em Agronomia, um sonho realizado!

In memoriam de Gabriel Barbosa.

Agradeço primeiramente a Ana Maria Martins Amaral e Severino Martins dos Santos, meus pais, aqueles que em nenhum momento deixaram de apoiar e incentivar nesse projeto de formação profissional. Estes sabem das dificuldades enfrentadas nesse caminho. Agradeço também a Emerson Martins Amaral, meu irmão, que mesmo distante nunca deixou de estar presente. Em Nome de Alaíde Martins e Maciel Batista agradeço a todos os familiares que acreditaram no meu desejo de ser Agrônomo.

Agradeço a Thanires de Lima Ramalho, minha companheira, aquela que deu afeto, carinho, conforto, amor, sempre presente em todos os momentos, apoiando e incentivando a prosseguir, a alcançar meus objetivos, por ser a amiga leal.

Agradeço a Eduardo Soares de Souza, professor, orientador, amigo. Obrigado pelos ensinamentos, conselhos, críticas. Sem seu incentivo, certamente eu teria adiando o sonho de ser Agrônomo. Favoreceu a realização de atividades acadêmicas de caráter de pesquisa e extensão. És sem dúvida um grande exemplo profissional e pessoal. Obrigado.

Agradeço a Patricia Lopes e Antônio Apolinário, pela amizade, pelas conversas, pelos ensinamentos pessoais e profissionais, pela ajuda dentro e fora da universidade. Financiaram diversas vezes custos com minha graduação, das quais serei eternamente grato, e não só por mim, mas por todos aqueles que receberam tal generosidade. És antes de tudo, família.

Agradeço especialmente ao grupo de estudos, de amigos e de família “agrocentrão”, das quais faço questão de fazer mencioná-los: Adriana Nunes, Jardel Moreira, Patricia Lopes, Tamires Eduvirgem, Tamires Keila, Simone Andrea e Yuri Rafael. Rimos, brigamos, choramos e comemoramos juntos durante os anos de graduação. Um grupo de estudo que se transformou em laços de amizade, de sangue..

Agradeço ao grupo de estudos e pesquisas em eco-hidrologia do semiárido, ao Observatório Nacional da dinâmica Água e Carbono do Bioma Caatinga (ONDA-CBC), da qual fiz parte durante os anos de graduação. Através de Rodolfo Souza, Antônio Antonino e José Romualdo agradeço a todos os contribuíram na realização de atividade de pesquisa.

A todos os novos amigos de graduação que sempre estiveram presentes no dia a dia: Antônio Genesis, Carina Andrade, Fernando Augusto, Gleidson Braz, Joel Andrade, Jonathas Alencar,

Lauizy Andrade, Manuevely Silva, Pedro Felipe, Rafaela Marques, Raquel Miranda, Rayles Moreira, Thiago Nunes. Companheiros de Batalha que grandiosamente concluem a graduação ao meu lado.

Agradecimento especial para Edvanda Barbosa, professora de português do ensino fundamental. Mulher forte, guerreira, exemplo de vida, seus conselhos sempre foram valiosos e dignos de serem seguidos. Eternamente grato por tudo. Em nome dela, agradeço a todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram para minha educação, pessoal e profissional.

Em nome de Alan Cezar, Avani Torres, Carlos Alberto, Diana Freitas, Ellen Viegas, Genival Barros, João Amorim, Rosa Honorato, Veridiana Luz e Walter Evangelista, quero agradecer a todos os professores(as) que lecionaram as disciplinas da graduação. Estes, como tantos outros, são exemplos de profissionais a serem seguidos, exemplos de pessoas a serem seguidas. Não ensinaram apenas conteúdos programáticos de disciplinas, ensinaram também como ser profissionais, como ser éticos e justos. Aqueles que deixei de comentar, sintam-se contemplados. Obrigado!

Em nome de Cícero Lopes e João Batista, todos os funcionários, técnicos, terceirizados, motoristas e guardas, obrigado.

A todos os amigos de outros períodos, cursos e pós-graduandos, que de algum modo estiveram presentes no decorrer da graduação e contribuíram para a minha formação, meu muito obrigado. Destaco Aline Sheila, Cynthia Wrigth, Denizard Oreska, Hugo Felipe, Iêda Simão, Raliuson Souza, Sidney Gustavo.

Aqueles que deixei de mencionar mas sabem que contribuíram, além de todos aqueles anteriormente citados, peço primeiramente desculpas, por quaisquer inconveniente, e agradeço. Obrigado!

Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABELAS.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
INTRODUÇÃO.....	13
OBJETIVOS.....	14
Geral.....	14
Específicos.....	14
REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
MATERIAL E MÉTODOS.....	18
Localização do experimento.....	18
Procedimentos experimentais.....	20
Esquema experimental de irrigação.....	20
Aferição da eficiência de aplicação da água.....	21
Aplicação do experimento em campo.....	23
Determinação das propriedades hidrodinâmicas do solo.....	25
Análise Textural.....	26
Determinação dos componentes horizontais e verticais da frente de umedecimento.....	27
Estatística descritiva e análise gráfica.....	28
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
CONCLUSÕES.....	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
ANEXOS.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geográfico e localização das áreas experimentais.....	19
Figura 2: Croqui do esquema experimental - Sistemas de irrigação.....	21
Figura 3: Aferição da profundidade (A) e do diâmetro (B) da frente de molhamento a partir do gotejamento.....	24
Figura 4: Metodologia Beerkan.....	26
Figura 5: Infiltração acumulada e fluxo de infiltração para os pontos aferidos nos solos estudados.	29
Figura 6: Relação entre o diâmetro observado, diâmetro estimado (A) e a profundidade observada e a profundidade estimada (B) ao longo do tempo no Solo FAr.....	36
Figura 7: Relação entre o diâmetro observado, diâmetro estimado (A) e a profundidade observada e a profundidade estimada (B) ao longo do tempo no Solo FAAr.....	37
Figura 8: Relação entre diâmetro observado e estimado vs profundidade observada e estimada, para o Solo FAr.....	38
Figura 9: Relação entre diâmetro observado e estimado vs profundidade observada e estimada, para o Solo FAAr.....	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Relação textural dos diferentes solos em diferentes profundidades.....	19
Tabela 2. Valores utilizados para classificação do CUD e CUE.....	22
Tabela 3. Valores utilizados para classificação da Ea e CV.....	22
Tabela 4: Comparativo entre a vazão sugerida pelo fabricante e a vazão real aferida, a uma pressão de trabalho de 2,5 atm.....	23
Tabela 5: Coeficiente de determinação da qualidade e eficiência dos sistemas de irrigação.....	23
Tabela 6. Relação dos intervalos de tempo (t).....	24
Tabela 7: Parâmetros estatísticos das variáveis obtidas a partir da metodologia Beerkan após o processamento do Algoritmo Beerkan (BEST).....	30
Tabela 8: Valores médios das variáveis estudadas (cm), partir de uma vazão submetida a uma pressão média de trabalho de 2,5 atm.....	33

AMARAL, Erison Martins. Infiltração e redistribuição da água em solos irrigados por gotejamento: caracterização do avanço da frente de molhamento. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Pernambuco, 2019.

*

RESUMO

A eficiência da aplicação da água torna o gotejamento como o sistema de irrigação de maior caráter expansivo da agricultura mundial moderna. Uma das características observáveis em um solo irrigado por gotejo é a frente de molhamento. A utilização de modelos matemáticos para estimar as dimensões dessa frente é importante para o projeto de sistemas de gotejamento, utilizando a condutividade hidráulica saturada (K_s) do solo como parâmetro de ajuste e calibração. O método semifísico Beerkan determina as propriedades hidrodinâmicas do solo, dentre elas, K_s . Assim, o objetivo do trabalho foi investigar a relação entre o avanço da frente de molhamento do solo em um sistema de irrigação por gotejamento e com um método semifísico. O experimento foi realizado na UFRPE/UAST, irrigando dois solos (FAR e FAAR), através de três sistemas de irrigação por gotejamento, com três vazões diferentes (2,8, 4,4 e 8,3 L h⁻¹), analisadas durante dez intervalos de tempo (5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 110 min). As dimensões aferidas foram o diâmetro (d) e a profundidade (p), dadas em centímetros (cm). Os Solos FAR e FAAR obtiveram valores próximos, para as dimensões observadas d e p. As melhores respostas a irrigação no tempo, para o Solo FAR foram encontradas para a vazão 8,3 L h⁻¹, por 30 min. de irrigação para (d) e 8,3 L h⁻¹, por 50 min. para (p). No Solo FAAR, as melhores respostas foram vazão 8,3 L h⁻¹, por 50 min e vazão 8,3 L h⁻¹, por 70 min, para (d) e (p), respectivamente. Foi possível estimar as dimensões geométricas da frente de molhamento, diâmetro e profundidade, a partir da K_s obtida a partir da metodologia Beerkan. As dimensões estimadas a partir de K_s obtiveram uma correlação positiva com as dimensões observadas, com $R^2 > 0,90$ para todas as correlações. As equações ajustadas podem ser utilizadas para estimar a área e volume de solos molhados para todas as vazões em qualquer intervalo de tempo.

Palavras Chave: Dimensões geométricas, eficiência de aplicação, gotejo, infiltração, irrigação, solo.

* **Comitê Orientador: Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza** - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Unidade Acadêmica de Serra Talhada.

AMARAL, Erison Martins. Water infiltration and redistribution in drip irrigated soils: characterization of wetting front advancement. 2019. Course Conclusion Paper (Bachelor Degree in Agronomy) - Federal Rural University of Pernambuco. Serra Talhada Academic Unit, Pernambuco, 2019.

*

ABSTRACT

Water efficiency makes dripping the most expansive irrigation system in modern world agriculture. One of the observable characteristics in drip irrigated soil is the wetness front. The use of mathematical models to estimate the dimensions of this front is important for the design of drip systems, using the saturated hydraulic conductivity (K_s) of the soil as a parameter of adjustment and calibration. The Beerkan semiphysical method determines the hydrodynamic properties of the soil, among them, K_s . Thus, this work aimed to investigate the relationship between the advance of the soil wetness front in a drip irrigation system and with a semi-physical method. The experiment was carried out at UFRPE/UAST, irrigating two soils (FAr and FAAR), through three dripping irrigation systems, with three different flow rates (2.8, 4.4 and 8.3 L h⁻¹) for ten intervals of time (5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 110 min.). The measured dimensions were diameter (d) and depth (p), given in centimeters (cm). Soils FAr and FAAR obtained similar values for the observed dimensions (d and p). The best time irrigation responses for the Soil FAr were found for the 8.3 L h⁻¹ flow for 30 min of irrigation for (d), and 8.3 L h⁻¹ for 50 min for (p). In the FAAR soil, the best responses were flow 8.3 L h⁻¹ for 50 min and flow 8.3 L h⁻¹ for 70 min for (d) and (p), respectively. It was possible to estimate the geometrical dimensions of the wetness front, diameter and depth from the K_s obtained from the Beerkan methodology. The estimated dimensions from K_s obtained a positive correlation with the observed dimensions, with $R^2 > 0.90$ for all correlations. The adjusted equations can be used to estimate the area and volume of wet soils for all flows at any time interval.

Keywords: Geometric dimensions, application efficiency, dripping, infiltration, irrigation, soil.

* Steering Committee: Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza - Federal Rural University of Pernambuco. Serra Talhada Academic Unit.

INTRODUÇÃO

A eficiência da aplicação da água na zona efetiva de absorção das raízes das plantas, aliada à sua economia, quando bem dimensionado, torna o gotejamento como o sistema de irrigação de maior caráter expansivo da agricultura mundial moderna (TOLENTINO JÚNIOR et al. 2018). O nível de investimento inicial relativamente alto requer técnicas adequadas de manejo de irrigação, que vise o uso consciente da água e garanta o retorno de tal investimento o mais rápido possível (COELHO; OR, 1999).

As propriedades hidráulicas do sistema por gotejo permitem a sua utilização em praticamente todos os tipos de solos, sendo estes, responsáveis pelo movimento da água pós irrigação e suas informações, tanto do sistema irrigante quanto do solo, permitem dimensionar corretamente uma área irrigada (DASBERG; BRESLER, 1985). O dimensionamento e a precisão no uso da irrigação por gotejamento são dependentes de fatores ambientais relacionados principalmente as propriedades do solo, com destaque para a condutividade hidráulica e a capacidade de retenção de água no solo, portanto, a capacidade de armazenamento de água no solo determina o manejo da irrigação a ser adotado (SOUZA FILHO et al. 2013).

Um das características observáveis em um solo irrigado por gotejo, que quando bem mensurado pode vir a dar suporte a um eficiente planejamento a frente de molhamento, zona de umidade que se forma em torno do ponto onde há deposição de água (BARROS et al. 2009). Em solos de textura argilosa, o bulbo tende a ser maior horizontalmente e pouco profundo, devido às forças capilares mais acentuadas nesses solos, enquanto que em solos de textura mais arenosa, ocorre uma inversão, o movimento da água é maior na direção vertical, por sua vez os solos de textura franca apresentam uma forma intermediária, aproximando-se de um formato semiesférico (GOMES, 1994).

Informações das dimensões geométricas da frente de molhamento devem ser levadas em consideração no manejo da irrigação localizada, principalmente para estimar o volume de solo molhado, a vazão do emissor e o tempo de irrigação, bem como a lâmina e frequência de irrigação, número de gotejadores e dimensionamento hidráulico (MAIA et al. 2010). Tais conhecimentos são importantes para otimizar o uso da água, evitando o escoamento superficial ou a percolação profunda.

Conhecer as propriedades físico-hídricas do solo irrigado é entender o comportamento da água e seu processo de redistribuição (SOUZA; MATSURA, 2004). Para isso, soluções analíticas, que levam em consideração a assimetria da infiltração da água no solo, são as mais utilizadas,

porém são válidas apenas para fluxo em condições estacionárias (LUBANA; NARDA, 2001). Uma vez que o fluxo e a redistribuição da água nessas condições dependem da umidade e do potencial matricial, essas informações podem ser correlacionadas com a frente de umedecimento a partir das informações obtidas das curvas de retenção de água no solo ($\theta(h)$) e de condutividade hidráulica do solo ($K(\theta)$) (MUBARAK et al. 2009).

Um método semifísico, denominado Beerkan, propõe a estimativa dos parâmetros das curvas de retenção e de condutividade da água no solo considerando a textura e a estrutura do solo. Uma alternativa para analisar as variações estruturais é através de medidas do fluxo de infiltração (SOUZA et al. 2008). A utilização dos valores obtidos a partir da metodologia Beerkan podem servir de parâmetros de calibração e ajustes de equações para estimativas das dimensões geométricas da frente de molhamento (SCHWARTZMAN; ZUR, 1986; MUKARAK et al. 2009), auxiliando no planejamento e dimensionamento de sistemas de irrigação localizada por gotejamento em diferentes solos, por diferentes vazões, submetidos a uma irrigação em diferentes períodos de tempo. Assim como o gotejamento, o infiltrômetro de anel simples permite obter uma infiltração de caráter tridimensional axissimétrico, e por isso, a obtenção das propriedades hidrodinâmicas com essa metodologia poderá auxiliar no presente estudo.

OBJETIVOS

Geral

Investigar a relação entre o avanço da frente de molhamento do solo em um sistema de irrigação por gotejamento e com um método semifísico.

Específicos

- Avaliar o comportamento do avanço da frente de molhamento em diferentes solos submetidos a sistemas de irrigação por gotejamento com diferentes emissores.
- Relacionar o avanço do umedecimento do solo com as propriedades físico-hídricas obtidas pela metodologia Beerkan;
- Validar modelos matemáticos de estimativas das dimensões geométricas do avanço de água em diferentes solos.

REFERENCIAL TEÓRICO

A agricultura ocupa 12,2% da superfície terrestre, responsável pelo consumo 7% das águas superficiais, em torno de 70% da água consumida por meio da irrigação (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019). Equilibrar a demanda por água doce com os finitos recursos de suas fontes continua sendo um dos maiores dilemas da humanidade na atualidade (GRAFTON et al. 2018; WWAP, 2014). O manejo adequado da água na agricultura deve ser integralmente analisado no processo de produção agrícola, devendo ser inserido dentro do contexto de um sistema integrado, objetivando a eficiência de seu uso (CARDOSO et al. 1998).

No Brasil, a agricultura ocupa apenas 9% do território, com consumo de $836 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de água destinados a irrigação, representado apenas 0,9% da disponibilidade hídrica superficial do país, que é de $91.271 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A mudança espacial da produção agropecuária brasileira se deu na expansão dos cultivos irrigados. A irrigação passou de 462.000 hectares (ha) em 1960 para 6,1 milhões em 2014 (MAPA, 2017), predominantemente de pivôs centrais, que até 2017 compreendia de 23.181 unidades, totalizando 1.476.101 ha ocupados, o que corresponde a cerca de 20% da área irrigada total e 30% da área irrigada mecanizada (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019). Segundo a Agência Nacional de Águas (2018), o uso da água no meio rural representa 80,7% da demanda de captação de água total brasileira, dos quais 68,4% são destinados à irrigação.

Os debates sobre o uso consciente e eficiente da água fez surgir um novo conceito de irrigação, com precisão baseada no conhecimento para fornecer a aplicação confiável, que pode ser complementada por irrigação fracionada e reutilização de águas residuais. Tal conceito de uso eficiente da água baseia-se no seu menor consumo possível, por unidade de área por unidade de tempo, e que favoreça a manutenção, a conservação ou a melhoria da qualidade da água, para isso integra vários componentes, com destaque para as reduções de perdas na fonte, na condução e na aplicação (PAZ et al. 2000).

As novas tecnologias de irrigação constituem uma importante estratégia para o uso eficiente da água, destacando a aplicação localizada de água (MAIA et al. 2010). Dentre os sistemas desenvolvidos para satisfazer tais necessidades, destaca-se nos métodos pressurizados, a microaspersão e o gotejamento. O conceito de irrigação por gotejamento surge entre a década de 1960 e 1970, sendo então considerada como uma tecnologia emergente de aplicação limitada para apenas cultivos especiais de alto preço. Atualmente é usado em uma ampla variedades de culturas (NAKAYAMA; BUCKS, 1991). Nos últimos anos, o uso da irrigação por gotejo foi a mais idealizada no mundo, a exemplo de Israel, que irriga mais de 75% de sua área agrícola com esse

sistema, evitando que a água seja desperdiçada no resto do solo e otimizou as condições de umidade e aeração, resultando em maiores rendimentos e economias significativas em água, energia e fertilizantes (ALEXANDRATOS et al. 2019).

O sistema de irrigação por gotejamento como um sistema de alta frequência de aplicação de baixos volumes de água diretamente na área de absorção das plantas, através de um ou mais pontos emissores em superfície ou subsuperfície, com baixas pressões de trabalho (0,2 – 2,5 atm) e baixas vazões (1 - 30 L h⁻¹) (DASBERG; BRESLER, 1985), é o sistema de melhor ajuste para regiões semiáridas e áridas do planeta, com satisfatórias taxas de economia, quando comparado com os outros métodos e sistemas de irrigação (HAMAMI; NESSEREDDINE, 2018). Porém, a irrigação por gotejamento apresenta problemas com entupimento de emissores, limita o desenvolvimento da raiz da planta, favorece o acúmulo de sal perto das plantas e reduz a capacidade do solo de absorver CO₂ (PUY et al. 2016).

O sistema de irrigação por gotejamento forma uma área úmida em torno do ponto de emissão, podendo ser definida como bulbo molhado, frente de molhamento ou avanço de água, e em alguns casos, essa área tende a ter um formato geométrico circular semiesférico, ou similar, mas quando os gotejadores são próximos, forma-se uma faixa molhada (BERNARDO et al. 2006). É inerente ao gotejamento a formação, no perfil do solo, de uma área de molhamento mais desuniforme quando comparado à aspersão (SCHWARTZMAN; ZUR, 1996), porém, quando há intersecção de bulbos, a umidade do solo na camada de 0 - 20 cm de profundidade tem maior coeficiente de uniformidade e, sem sobreposição, isto ocorre entre 20 - 40 cm de profundidade (SOUZA, 2002). Ainda de acordo com Schwartzman e Zur, (1996), a frente de molhamento deve atingir até o limite da profundidade efetiva das raízes, para que haja resposta positiva das culturas irrigadas.

As dimensões da frente de molhamento dependem, sobretudo, da estrutura e textura do solo, frequência de aplicação e umidade inicial do solo (VERMEIREN; JOBLING 1984; SOUZA, 2002; GARDENAS et al. 2005; SKAGGS et al. 2010). Em solos de textura argilosa, essa frente tende a ser maior horizontalmente e pouco profundo, devido às forças capilares mais acentuadas nesses solos, enquanto que em solos de textura mais arenosa, ocorre uma inversão, o movimento da água é maior na direção vertical, por sua vez os solos de textura franca apresentam uma forma intermediária, aproximando-se de um formato semiesférico (GOMES, 1994).

O Conhecimento das dimensões geométricas, horizontais e verticais, pelas quais a água se espalha nos solos é essencial para o planejamento de sistemas econômicos e eficientes que

asseguram a irrigação uniforme e precisa de água na zona radicular das plantas (FERNANDEZ-GALVEZ; SIMMONDS, 2006; KANDELOUS; SIMUNEK, 2010; SUBBAIAH, 2013). O tamanho desse padrão de molhamento é um possível fator de determinação do número mínimo de emissores ao longo de uma linha de gotejamento.

Estimar as dimensões do avanço da água é importante para o projeto de sistemas de gotejamento para evitar que a água seja percolada. Pesquisas nessa categoria são realizadas desde que essa metodologia foi criada, destacando Bresler, (1978) e Revol et al. (1997). As propriedades hidrodinâmicas do solo influenciam diretamente em tais dimensões, das quais pode-se destacar a condutividade hidráulica do solo (K_s), sendo esta uma variável utilizada em diversos modelos de estimativas de dimensões geométricas de frente de molhamento. A K_s pode ser estimada por diferentes métodos diretos e indiretos, que são através da relação da condutividade hidráulica com propriedades do solo (distribuição do tamanho dos poros, textura, porosidade drenável, densidade do solo, etc), e os diretos são de determinação em laboratórios ou em campo (MARQUES et al. 2008).

Os métodos laboratoriais determinam a K_s através de amostras indeformadas submetidas ao umedecimento e/ou saturação, como o permeâmetro de carga constante (KLUTE, 1965) e de carga decrescente (HARTGE; HORN, 1989), a câmara de pressão de Richards (RICHARDS, 1965). Os métodos em campo destacam-se os métodos de infiltração por anel simples ou anel duplo (BERTRAND, 1965) e infiltrômetro a disco (SMETTEM; CLOTHIER, 1989). Um dos métodos utilizados para a determinação de K_s , entre outras propriedades hidrodinâmicas do solo é o Beerkan, que propõe a obtenção da curva de infiltração acumulada em função do tempo, com um infiltrômetro a disco ou com um infiltrômetro de anel simples (ALAGNA et al. 2019). Estes ensaios de infiltração consistem em anotar o tempo que volumes constantes de água, adicionados continuamente no anel, levam para ser infiltrados (LASSABATÈRE et al. 2010). Esse teste fornece a infiltração tridimensional axissimétrica como uma função do tempo (FURTUNATO et al. 2013).

Simulações numéricas são ferramentas computacionais eficientes para estimar o comportamento da água pós gotejamento, desenvolvidas e ajustadas para diferentes condições (MUBARAK et al. 2009). Cote et al. (2003) combinou os modelos desenvolvidos por Philip, (1984) com equações de ajustes para estimar as dimensões da zona úmida pelo gotejamento. Barreto et al. (2008) utilizou o método da trincheira para monitorar a umidade do solo após a aplicação de água por gotejamento e avaliar a efetividade do avanço da água.

As referências na literatura são inúmeras, pois se trata de uma área de intensa pesquisa e aplicabilidade de resultados. Mais recentemente, Mubarak et al. (2009), ajustou as equações de Philip, (1984) juntamente com as propriedades hidrodinâmicas do solo, obtidas pela metodologia Beerkan (HAVERKAMP et al. 1998; BRAUD et al. 2005; LASSABATÈRE et al. 2006; SOUZA et al. 2008) para estimar o comportamento do avanço da água. Maia et al. (2010) ajustou modelos potenciais para estimar as dimensões geométricas do avanço da água, Malek e Peters (2010) apresentaram uma nova fórmula empírica para a previsão de dimensões molhadas a partir de um emissor por gotejamento.

Naglic et al., (2014) estudou a influência da textura, vazão e as condições iniciais de umidade do solo nas dimensões da zona molhada em dois tipos de solos. As dimensões do avanço da água foram obtidas numericamente, comparando-os com experimentos de irrigação com diferentes vazões, utilizando os dados obtidos para testar e refinar os parâmetros de um modelo analítico simples proposto por Schwartzman e Zur (1986). Obteve boas correlações entre as variáveis estudadas e as estimadas pelos modelos analíticos. Para a relação profundidade observada e profundidade estimada, obteve um $r^2 = 0,86$, já para a relação diâmetro observado e diâmetro estimado, obteve um $r^2 = 0,71$. Com relação a interação diâmetro no tempo, profundidade no tempo e diâmetro vs profundidade, para valores reais e valores estimados, obteve curvas crescentes positivas, para diferentes a diferentes intervalos de tempo, para diferentes vazões. Analisando graficamente obteve tendências de estabilização de crescimento para as variáveis estudadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização do experimento

O experimento foi realizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Unidade Acadêmica de Serra Talhada - UAST, em Serra Talhada-PE, região semiárida brasileira, com clima regional classificado por Köppen (PEEL et al. 2007) como Bhs, semiárido quente e seco, com média térmica superior a 25°C e pluviosidade anual de 642 mm (BEZERRA et al. 2010). Os solos predominantes são Cambissolos e a vegetação como sendo do tipo Caatinga.



A - Solo FAr; B - Solo FAAr. Fonte: google maps.

Figura 1: Mapa geográfico e localização das áreas experimentais.

Os solos estudados foram identificados e classificados como CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (BEZERRA et al. 2010), sendo o Solo FAr localizado a $7^{\circ} 57' 04,9''$ S & $38^{\circ} 17' 42,2''$ W, na cota de altitude 498 m e o Solo FAAr localizado a $7^{\circ} 57' 13,5''$ S & $38^{\circ} 17' 55,1''$ W, altitude 530 m (Figura 1). Informações descritivas dos solos encontram-se expressas na Tabela 1.

Tabela 1. Relação textural dos diferentes solos em diferentes profundidades.

Solo	Camada cm	Densidade do Solo g cm ⁻³	Argila -----%	Silte -----%	Areia -----%	Classe Textural	Cascalhos %
FAr	0-20	1,65	18,0	7,7	74,3	Franco Arenoso	15,98
	20-40	-	16,1	9,2	74,7	Franco Arenoso	32,87
	40-60	-	21,5	7,1	71,3	Franco Argilo Arenosa	26,81
FAAr	0-20	1,53	24,0	13,1	62,9	Franco Argilo Arenosa	<5,00
	20-40	-	24,0	12,0	63,9	Franco Argilo Arenosa	<5,00
	40-60	-	24,1	12,4	63,5	Franco Argilo Arenosa	<5,00

FAr – Franco Arenoso; FAAr – Franco Argilo Arenosa.

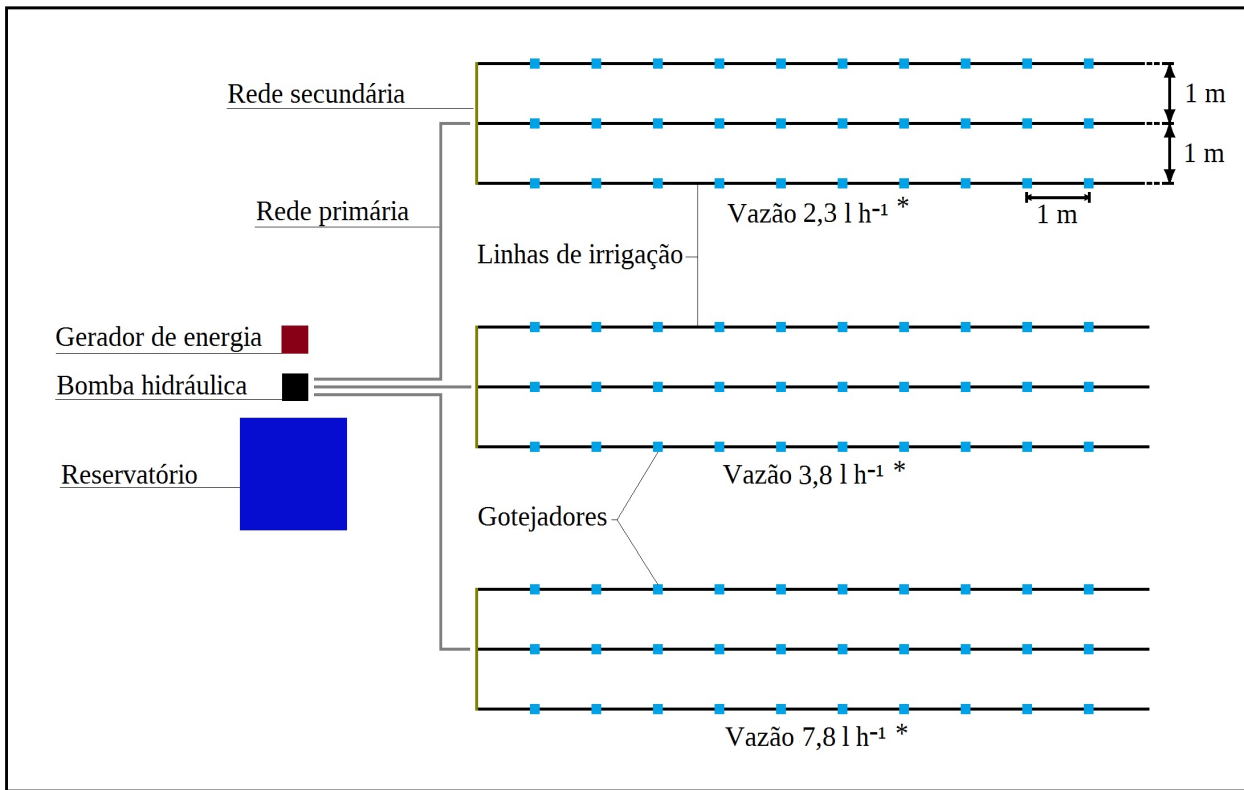
O Solo Franco Arenoso (FAR) possui coloração amarelada, pálida, é pouco profundo e rico em cascalhos em todo o perfil, além de maior densidade em superfície (Tabela 1), está localizado na topografia mais baixa, início de uma região de sedimentação e acúmulo de materiais, além disso, sofreu influência da ascensão do nível do lençol freático provocado pela variação do nível das águas do açude Saco (CPMR, 2005). O Solo Franco Argilo Arenoso (FAAr) possui uma coloração mais avermelhada, profundidade superior a 1 m, pobre em materiais grosseiros e perfil mais uniforme, com menor densidade em superfície, localizado em uma topografia de elevação, intermediária entre a cadeia montanhosa e o vale de sedimentação. Segundo EMBRAPA (1997), os solos são classificados em plano e suave ondulado, para FAR e FAAr, respectivamente. Ambos os solos foram explorados, nos últimos anos, com fins agrícolas, ao início de cada período chuvoso, tendo como principais tratamentos culturais, a aração e a gradagem mecanizada e capina manual. Como principais culturas, destacam-se o feijão caupi (*Vigna unguiculata*) e o milho (*Zea mays*). Atualmente encontra-se em pousio, com vegetação em fase de regeneração.

Procedimentos experimentais

Esquema experimental de irrigação

Foram montados três sistemas de irrigação por gotejamento com emissores autocompensantes de três vazões, selecionados de acordo com a disponibilidade comercial local. Cada sistema de irrigação é composto por três linhas de tubulação de polietileno de 16 mm de diâmetro, sendo estas com dez emissores, cada, de mesma vazão. As linhas foram espaçadas a cada um metro, mesma distância adotada entre os emissores, estes por sua vez dimensionados para evitar a sobreposição da água ao decorrer do tempo de experimento. O modelo do experimento está esquematizado na Figura 2.

Segundo o catálogo do fabricante (IDROP, 2009), os emissores autocompensantes utilizados no experimento tem capacidade de emissão de água de 2,3 L h⁻¹ (Q₁), 3,2 L h⁻¹ (Q₂) e 7,8 L h⁻¹ (Q₃), quando submetidos a uma pressão de trabalho de 25 mca.



* vazões sugeridas pelo fabricante;

Figura 2: Croqui do esquema experimental - Sistemas de irrigação

Aferição da eficiência de aplicação da água

Para aferir as vazões reais dos emissores, bem como avaliar a uniformidade de aplicação da água e da sua eficiência, os sistemas foram submetidos a testes preliminares no laboratório de hidráulica da UFRPE/UAST, adaptando a metodologia de Karmeli e Keller (1975).

Os sistemas foram ligados por 1h e toda a vazão emitida por todos os gotejadores foram coletadas e quantificadas através de uma proveta. As informações coletadas serviram de banco de dados para as seguintes equações:

$$CUD = 100 \cdot \left(\frac{q_{25\%}}{\bar{q}} \right) \quad \text{(equação 01)}$$

$$CUE = 1 - \left(\frac{S_q}{\bar{q}} \right) \quad \text{(equação 02)}$$

$$CV = 100 \cdot \left(\frac{S_q}{\bar{q}} \right) \quad \text{(equação 03)}$$

$$Ea = 0,9 \cdot CUD \quad \text{(equação 04)}$$

sendo CUD – Coeficiente de uniformidade de distribuição (%); CUE – Coeficiente de uniformidade estática (%); CV – Coeficiente de variação (%); Ea – Eficiência de aplicação (%); q_1 a vazão do emissor ($L h^{-1}$), \bar{q} é a média das vazões dos emissores ($L h^{-1}$), n o número de emissores, $q_{25\%}$ a média de 25% das vazões, sendo as vazões mais baixas ($L h^{-1}$) e S_q é o desvio padrão das vazões dos emissores ($L h^{-1}$),

As Tabela 2 e Tabela 3 expressam as classificações dos sistemas de irrigação segundo o CUD, CUE, Ea e CV.

Tabela 2. Valores utilizados para classificação do CUD e CUE.

CUE	CUD	Classificação
%		
> 90	> 84	Excelente
80 – 90	68 – 84	Bom
70 – 80	52 – 68	Razoável
60 – 70	32 – 52	Ruim
< 60	< 36	Inaceitável

Fonte: Retirado e modificado de Mantovani (2001).

Tabela 3. Valores utilizados para classificação da Ea e CV.

Ea	Classificação	CV	Classificação
%			
≥ 95	Ideal	≤ 10	Bom
80 – 90	Aceitável	10 – 20	Razoável
< 80	Inaceitável	> 20	Inaceitável

Fonte: Retirado e Modificado de Bernardo et al. (2006).

A emissão de água pelos gotejadores apresentaram uma variação significativa, quando comparado a vazão sugerida pelo fabricante com a vazão real, ao serem submetidos a pressão de trabalho média de 2,5 atm. Para as vazões Q_1 , Q_2 e Q_3 , houve um aumento de aproximadamente 23%, 38% e 6%, respectivamente. Diante disto, admitiu-se as vazões reais para Q_1 , Q_2 e Q_3 . A Tabela 4 destaca a baixa variação das vazões quando comparados a média geral, o que mostra uma uniformidade na emissão da água.

Tabela 4: Comparativo entre a vazão sugerida pelo fabricante e a vazão real aferida, a uma pressão de trabalho de 2,5 atm.

Nº de Emissores	Q _s	Q _{x̄}	DP	CV
	-----L h ⁻¹ -----			
30	2,2	2,8	0,26	10
30	3,2	4,4	0,26	6
30	7,8	8,3	0,24	3

Q_s – vazão do emissor sugerida pelo fabricante; Q_{x̄} – vazão média dos emissores; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

Ao analisar as vazões dos emissores, comprovou-se que os sistemas para Q₂ e Q₃ apresentaram um excelente rendimento hidráulico. O CUD foi classificado como Excelente para Q₁, Q₂ e Q₃. O CUE foi classificado semelhante ao CUD, para todas as vazões. O CV (Tabela 4) foi classificado como Bom pra Q₁, Q₂ e Q₃. Por fim, a eficiência de aplicação de água, que foi classificado como Razoável para Q₁, Q₂ e Q₃ (Tabela 5). Q₁ apresentou um comportamento mais variável devido ao modelo de acoplamento do emissor na linha de irrigação, que permitia a passagem parcial do um pequeno volume água, por parte de alguns emissores, elevando a variabilidade do sistema.

Tabela 5: Coeficiente de determinação da qualidade e eficiência dos sistemas de irrigação.

Aferições	Vazão dos Emissores (L h ⁻¹)		
	2,80	4,42	8,30
CUD	90,63	94,29	95,92
CUE	89,57	94,11	97,13
Ea	81,57	84,86	86,32

CUD – coeficiente de uniformidade de aplicação; CUE – coeficiente de uniformidade estática; Ea – eficiência de aplicação.

Aplicação do experimento em campo

Após as análises laboratoriais, os sistemas foram aplicados aos testes em campo. Para avaliar o comportamento da frente de molhamento ao longo do tempo, para as respectivas vazões, foram determinados dez intervalos de tempo (t), sendo denominados de t₁, t₂, t₃ ... t₁₀, em horas (h). Os intervalos de tempo estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6. Relação dos intervalos de tempo (t).

	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉	t ₁₀
Tempo (h)	0,08	0,17	0,25	0,33	0,50	0,67	0,83	1,17	1,50	1,83

As variáveis estudadas foram o diâmetro (d(cm)), e a profundidade (p(cm)), para cada intervalo temporal, mensuradas a partir de trenas milimetradas. As aferições foram realizadas simultaneamente entre as linhas, sendo aleatórios os pontos aferidos (emissores). A Figura 3A, destaca a profundidade para o Solo FAr, Q₁ e t₁₀ e o diâmetro, Figura 3B, para Solo FAAr, Q₁ e t₅.

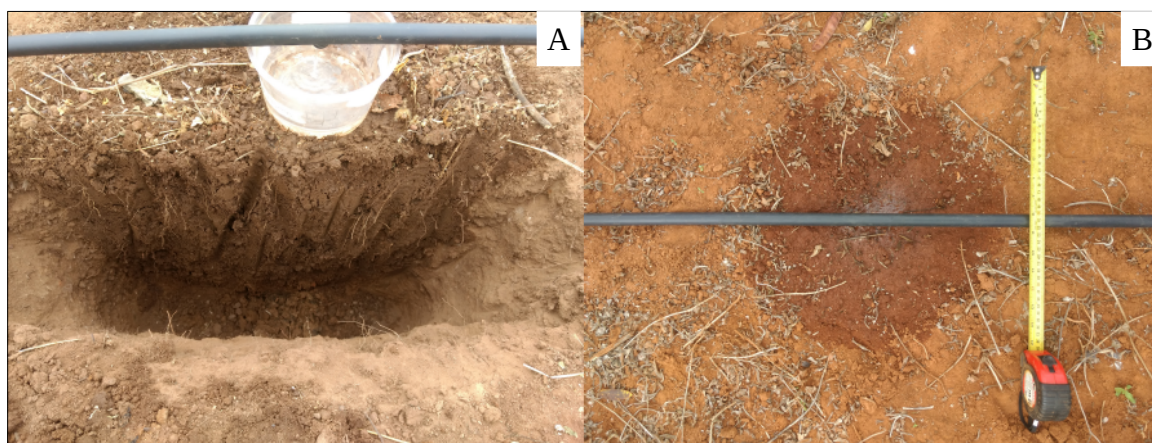


Figura 3: Aferição da profundidade (A) e do diâmetro (B) da frente de molhamento a partir do gotejamento.

Para garantir uniformidade nas propriedades hidráulicas do sistema de irrigação (pressão, vazão), foi utilizada uma bomba hidráulica periférica de ½ hp (horse power) de potência, com capacidade de altura manométrica total de 25 mca (metro de coluna de água), acoplada a um reservatório e impulsionada por um gerador elétrico a gasolina.

Os solos FAr e FAAr foram submetidos a irrigação para as três vazões utilizadas. Os sistemas foram acionados um de cada, sendo que um só iniciava ao termino do outro, por sua vez, foram na ordem Q₁, Q₂ e Q₃. Uma vez acionado, a irrigação seguiu ininterrupta até completar o t₁₀. Foram sorteados um emissor por linha para cada t. Ao atingir o limite do t_n, os emissores foram isolados para as aferições do d e p (Figura 3A).

Para aferir a pressão de trabalho, foi instalado um manômetro analógico ao final da linha central, para todos os sistemas, aferindo a pressão após todas as perdas de carga provocadas pelo sistema.

Os experimentos em campo ocorreram em dias diferentes. O primeiro solo estudado foi o FAr, durante dois dias. Posteriormente, o solo FAAr foi submetido a irrigação, durante um único dia.

Determinação das propriedades hidrodinâmicas do solo

Para a caracterização da área experimental, quanto as propriedades hidrodinâmicas do solo, foram escolhidos aleatoriamente nove pontos amostrados, por solo, na qual foram submetidos a testes de infiltração por anel simples, seguindo a metodologia Beerkan. Essa metodologia consistiu na contenção de uma determinada área da superfície do solo, através de um cilindro cravado cuidadosamente, na qual foram adicionados um volume de água constante sempre que a infiltração chegava próximo ao fim (Figura 4), sendo o tempo aferido a cada novo volume adicionado, através de um cronometro digital acionado ao adicionar o primeiro volume ao solo.

Foram coletadas, para cada teste realizado, amostras de solo para a determinação da umidade inicial (θ_i), umidade final (θ_s) e densidade do solo (ρ_s) para a camada superficial. Imediatamente próximo aos testes de infiltração, foram realizadas prospecções e coletas de solo para análise textural e determinação da curva granulométrica, em três camadas. As amostras de θ_i , θ_s e ρ_s foram pesadas e levadas para secagem em estufa a temperatura média de 105°C, expostas por 24hs, já as amostras de textura passaram por um processo de peneiragem, em peneira de 2 mm, seguidas para secagem ao ar.

Para determinação das curvas de umidade e retenção de água no solo, bem como a curva de condutividade hidráulica, as medidas levantadas pela metodologia Beerkan foram utilizadas como parâmetros de entrada para Algoritmo Beerkan (BEST) (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments) proposto por Lassabatère et al. (2006), na qual utilizou as informações de ρ_s e densidade das partículas (ρ_p), θ_i e raio do cilindro, bem como a curva granulométrica e as informações de tempo e lâmina acumulada. O BEST retorna as parâmetros estimados de forma (m , n e η) e de normalização (θ_s , K_s e h_g) necessários para validar os modelos de Van Genuchten (1980) e de Brooks & Corey (1964):

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad \text{sendo} \quad m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{equação 05})$$

$$K_{(\theta)} = K_s \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n \quad (\text{equação 06})$$

sendo θ a umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_r e θ_s as umidades volumétricas residual e saturada ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), respectivamente; h o potencial matricial (l); h_g é um valor de escala de h ; m e n são

parâmetros de forma; K_s a condutividade hidráulica saturada do solo (mm s^{-1}) e η o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica. Uma descrição mais aprofundada da metodologia Beerkan e do Algoritmo Beerkan (BEST) é descrita por Souza et al. (2006).



Figura 4: Metodologia Beerkan.

Análise Textural

As análises texturais seguiram a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017), modificada e adaptada com a metodologia proposta pela ABNT, (1988), para a sedimentação pelo método do densímetro. Preparou-se 20,00 g de terra fina seca ao ar (TFSA), 10 ml de solução dispersante hidróxido de sódio (NaOH) com concentração de 1 mol l^{-1} , 100 ml de água destilada, submetidos a 16h no agitador tipo Wagner. Posteriormente a mistura foi despejada em proveta de 1000 ml, com volume completado com água destilada, ao nível de 950 ml, demais volume (50ml) é referente ao densímetro. Paralelamente, uma proveta contendo água destilada, 940 ml, e solução de NaOH, 10 ml, foi preparada e utilizada para leitura em branco e calibração do densímetro. Após às 24h de leituras, a solução foi passada na peneira de 0,053 mm, para retenção das frações de areia. As amostras foram submetidas a secagem em estufa com temperatura média de 105°C por 24h.

Determinação dos componentes horizontais e verticais da frente de umedecimento

Paralelamente a estimativa e caracterização das dimensões da zona úmida, foi utilizados modelos matemáticos de estimativas dos componente horizontais e verticais, na perspectiva de validação destes modelos, bem como servir de parâmetro correlativo de eficiência de obtenção de dados. Estudos realizados por Ismail et al. (2014) utilizaram modelos matemáticos para estimar os diâmetros e as profundidades da frente de umedecimento. Estes modelos foram utilizados para estimar os diâmetros e as profundidades da zona úmida promovidas pelo volume de água emitida pelos emissores dos sistemas.

$$\pi_{1z} = K_s^{a1} \cdot Q_c^{b1} \cdot z \quad (\text{equação 07})$$

a1 e b1 são combinações de $(L \cdot T^{-1})^{a1} \cdot (L^3 \cdot T^{-1})^{b1} \cdot L = L^0 \cdot T^0$, assim, tem-se $a1 + 3b1 = 0$, para L e $-a1 - b1 = 0$, para T. Assim, $a1 = 1/2$ e $b1 = -1/2$.

$$\pi_{1z} = z \cdot \sqrt{\frac{K_s}{Q_c}} \quad (\text{equação 08})$$

esta por sua vez pode ser reescrita como

$$\pi_{2z} = K_s^{a2} \cdot Q_c^{b2} \cdot T \quad (\text{equação 09})$$

a2 e b2 são combinações de $(L \cdot T^{-1})^{a2} \cdot (L^3 \cdot T^{-1})^{b2} \cdot T$, assim, tem-se $a2 + 3b2 = 0$, para L e $-a2 - b2 + 1 = 0$, para T. Assim, $a2 = 3/2$ e $b2 = -1/2$.

$$\pi_{2z} = T \cdot \sqrt{\frac{K_s^3}{Q_c}} \quad (\text{equação 10})$$

obtêm-se assim,

$$\pi_{1z} = f(\pi_{2z}), \text{ logo } \pi_{1z} = \varphi_z \cdot \pi_{2z}^\alpha \quad (\text{equação 11})$$

A relação entre os dois termos pode ser resolvida com técnicas de ajuste de curvas, para os parâmetros de x e y.

$$z = x \cdot (\pi_{2z})^y \quad (\text{equação 12})$$

posteriormente, seguindo os mesmos princípios matemáticos, tem-se que

$$\pi_{1d} = f(\pi_{2d}), \text{ logo } \pi_{1d} = \varphi_d \cdot \pi_{2d}^\alpha \quad (\text{equação 13})$$

para tal:

$$\pi_{1d} = a \cdot (\pi_{2d})^b \quad (\text{equação 14})$$

A relação entre os dois termos pode ser resolvida com técnicas de ajuste de curvas, para os parâmetros de a e b.

$$d = a \cdot (\pi_{2d})^b \quad (\text{equação 15})$$

para todas as variáveis acima referidas, tem-se z , profundidade (m) relativo a p , K_s é a condutividade hidráulica saturada ($m\ h^{-1}$), obtida pela método Beerkan através do Algoritmo Beerkan (BEST), Q_e é a vazão do emissor ($m^3\ h^{-1}$), L é uma denominação para unidade espacial ou volumétrica (m^2 ou m^3) de acordo com a variável, T é uma denominação para unidade temporal (s, min, h) de acordo com a variável, a , b , x e y são parâmetros obtidos através da correlação desenvolvida pelos modelos, a partir de uma equação de ajuste do tipo potência, d é o diâmetro (m).

As análises e ajustes foram obtidas a partir do software RStudio (R Core Team, 2018), com o banco de dados levantado a partir do experimento.

Estatística descritiva e análise gráfica

Devido a não normalidade dos dados e o não ajuste à normalidade, por partes das variáveis respostas, d e p , em função dos solos, de Q_n e t_n , não foi possível apresentar um quadro estatístico de comparações de médias, sendo assim, às análises dos dados foram a partir de estatística descritiva básica, através de média, desvio padrão, valores máximos, mínimos, coeficientes de variação, bem análise gráfica. Os dados foram processados através de planilha eletrônica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios dos nove pontos aferidos, por solo, sendo utilizados como parâmetros únicos de caracterização dos solos estudados estão apresentados na Tabela 7. Observa-se que as propriedades hidrodinâmicas não variaram significativamente entre os solos, justificando a proximidade entre as dimensões de d e p para ambos os solos (Figura 8). Detalhe que, em termos numéricos, a maioria dos valores para o Solo FAr foram inferiores a FAAr, com destaque para a variação para K_s que apresentou uma diferença de $0,04\ mm\ s^{-1}$. O Solo FAr é rico em cascalho em sua estrutura (Tabela 1), promovendo um retardo na taxa de infiltração, devido a quebra dos caminhos capilares (CARLESSO; ZIMMERMANN, 2000; FIORIN, 2008), além de possuir maior teor de areia e maior densidade em superfície, enquanto o Solo FAAr é pobre em cascalho, possui um perfil mais homogêneo e maior teor de argila.

As curvas de infiltração acumulada e do fluxo de infiltração da água no Solo FAr apresentaram pequena variação para os pontos aferidos em ambos os solos. A variação ocorreu apenas nos tempos de infiltração, já que o volume de água aplicado foram semelhantes. A infiltração foi lenta no Solo FAr (Figura 5, Solo FAr) em relação a FAAr (Figura 5, Solo FAAr), conseqüentemente os fluxos também variaram na mesma proporção. Segundo Fiorin (2008), quanto maior for a concentração de areias no solo, maior é taxa de infiltração, entretanto, o Solo FAAr, menos arenoso que o FAr, foi quem apresentou tal característica, por sua vez, solos mais argilosos de estrutura estável e bem estruturados podem se sobressair aos arenosos (SILVA; KATO, 1997; FIORIN, 2008). Os fluxos para os pontos aferidos no Solo FAr apresentaram um padrão de curva mais suave, o que significa que o tempo para alcançar o regime permanente de infiltração foi maior. Esse comportamento no Solo FAAr foi mais abrupto, ou seja, tal regime foi alcançado mais rapidamente.

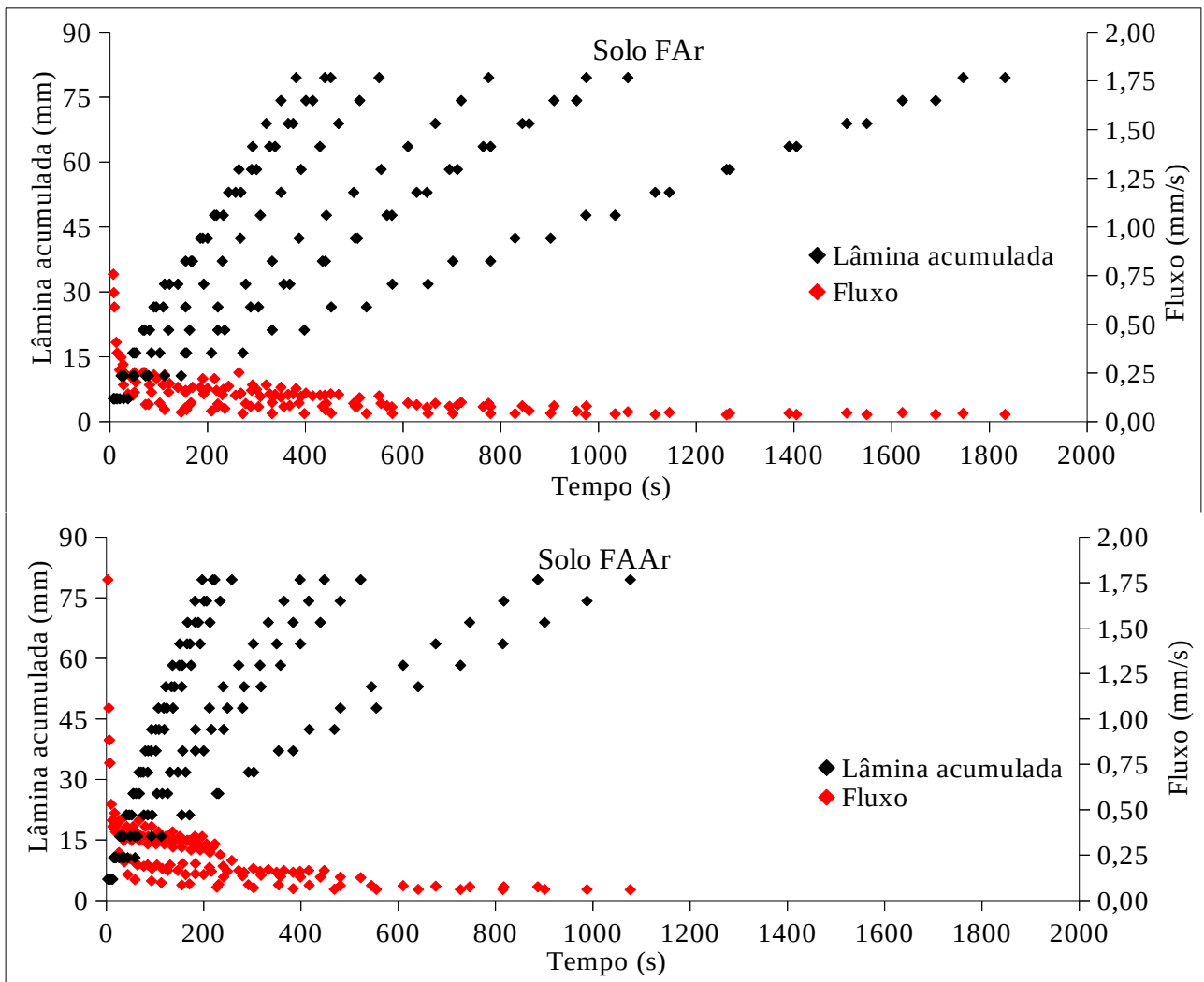


Figura 5: Infiltração acumulada e fluxo de infiltração para os pontos aferidos nos solos estudados.

Tabela 7: Parâmetros estatísticos das variáveis obtidas a partir da metodologia Beerkan após o processamento do Algoritmo Beerkan (BEST).

Solo	Variáveis estatísticas	θ_s	h_g	K_s	n	η	m	C_p	S
		$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	mm	mm s^{-1}	-	-	-	-	$\text{mm s}^{-0,5}$
A	$\mu \pm \sigma$	$0,38 \pm 0,05$	$19,86 \pm 14,13$	$0,09 \pm 0,05$	$2,15 \pm 0,04$	$17,25 \pm 4,39$	$0,07 \pm 0,02$	$2,47 \pm 0,13$	$1,04 \pm 0,47$
	Max	0,45	43,14	0,18	2,22	24,46	0,1	2,65	1,64
	Min	0,29	1,48	0,03	2,09	11,93	0,04	2,28	0,42
	CV (%)	13,16	71,22	55,4	2,01	25,43	26,58	5,15	44,99
B	$\mu \pm \sigma$	$0,42 \pm 0,04$	$23,8 \pm 8,07$	$0,13 \pm 0,07$	$2,15 \pm 0,01$	$16,25 \pm 0,93$	$0,07 \pm 0,005$	$2,46 \pm 0,03$	$1,53 \pm 0,43$
	Max	0,48	39,02	0,24	2,17	17,4	0,08	2,49	2,05
	Min	0,37	12,21	0,04	2,14	14,38	0,06	2,39	0,96
	CV (%)	8,9	33,9	52,36	0,53	5,74	6,92	1,31	27,98

θ_s – umidade volumétrica na saturação; h_g – valor de escala de h , K_s – condutividade hidráulica saturada; m , n e η são parâmetros de forma; C_p – parâmetro de forma; S – sorvidade; μ – média; σ – desvio padrão; Max – valores máximos; Min – valores mínimos; CV – coeficiente de variação;

Para melhor entender o comportamento da água no solo e melhor justificar os dados, é necessário compreender o efeito da capilaridade nesses processos. O movimento capilar é determinado pelo tamanho de poros, é a distribuição de tamanho de poros que determina a quantidade e taxa do movimento de água capilar no solo. Os poros não são retos e nem possuem forma regular, além disso, são preenchidos com ar, retardando ou impedindo o movimento de água por capilaridade. Duas forças provocam a capilaridade: a atração da água por sólidos (adsorção), e a tensão superficial da água, devida à atração das moléculas de água uma pelas outras (coesão). A abundância de médios a grandes poros capilares em solos arenosos permitem a rápida ascensão capilar inicial, mas limita a altura final. As argilas apresentam uma maior proporção de poros capilares muito finos, mas forças de atrito retardam a taxa na qual a água se move através deles, conseqüentemente, em argilas, a ascensão capilar é lenta inicialmente, mas com o tempo, geralmente, ultrapassa a das areias. A capilaridade é tradicionalmente ilustrada como um fenômeno ascendente, mas ocorrem movimentos em qualquer direção, uma vez que a atração entre os poros do solo e a água é eficaz na formação de um menisco de água em poros horizontais e verticais. Descrição realizada por (DE SOUZA PINTO, 2016; LEPSCH, 2016; TAVARES FILHO, 2016; BALDOVINO et al. 2017).

A Tabela 8 apresenta os valores médios das dimensões geométricas do avanço da água para os solos FAr e FAAr, para as vazões Q_1 , Q_2 e Q_3 , para cada intervalo de tempo entre t_1 e t_{10} . Para o Solo FAr, observa-se que para Q_1 t_{10} , d corresponde a 39,2 cm, contudo, tal dimensão só foi observada em Q_2 entre t_5 e t_6 , uma redução de quase 80 min de irrigação. Isso se torna ainda mais expressivo ao analisarmos Q_3 , que atingiu essa dimensão entre t_4 e t_5 que, embora não defira significativamente de Q_2 , reduziu em mais de 80 min de irrigação com relação a Q_1 . Já para o Solo FAAr, o comportamento foi semelhante ao FAr, mas com menor proporção. Q_1 t_{10} atingiu, para d , 43 cm, observado em Q_2 entre t_8 e t_9 , e em t_7 , para Q_3 , reduzindo em 60 min a irrigação. Quando analisamos a variável p , a dimensão Q_1 t_{10} é observada em Q_2 entre t_8 e t_9 , e entre t_6 e t_7 para Q_3 , no Solo FAr. Já no Solo FAAr, p , para Q_1 t_{10} , foi observado em Q_2 entre t_7 e t_8 , e Q_3 entre t_7 e t_8 .

Ao avaliar o volume de água utilizado para atingir tais dimensões, observa-se um melhor comportamento para Q_2 . Como antes mencionado, d para Q_1 t_{10} foram encontradas entre t_5 e t_6 em Q_2 , e entre t_4 e t_5 para Q_3 , isso para o solo FAr. Para Q_1 t_{10} , o volume utilizado foi de 5,13 L e, para Q_2 , entre t_5 e t_6 , foi entre 2,20 e 2,93 L, e para Q_3 , entre t_4 e t_5 , o volume utilizado foi entre 2,77 e 4,15 L. Para p , Q_1 t_{10} é observada em Q_2 entre t_8 e t_9 , e entre t_6 e t_7 para Q_3 , ou seja, entre 5,13 e 6,6 L, para Q_2 e 5,53 e 6,92 L. Para o solo FAAr, d para Q_1 t_{10} foi encontrado em Q_2 entre t_8 e t_9 e para

Q_3 , em t_7 . O volume de água utilizado em Q_2 foi de 5,13 e 6,60 L, para t_8 e t_9 , respectivamente, já para Q_3 t_7 consumiu 6,92 L de água. Para p, no solo FAAr, Q_1 t_{10} foi observado em Q_2 entre t_7 e t_8 , e Q_3 entre t_7 e t_8 , isso resulta em um consumo entre 3,67 e 5,13 L e entre 6,92 e 9,68 L, para Q_2 e Q_3 , respectivamente,

Embora Q_3 tenha utilizado menos tempo para alcançar as dimensões geométricas encontradas em Q_1 t_{10} , tanto no solo FAr quanto do solo FAAr, Q_2 apresentou menor consumo de água, de modo geral, para alcançar as mesmas dimensões.

O comportamento do avanço da água nos Solo FAr e FAAr, de t_1 a t_{10} para as vazões estudadas foram semelhantes, tanto para d quanto para p. Em poucos casos houve diferenciação no comportamento. No Solo FAr, para Q_1 , d variou ao longo do tempo, sendo um aumento rápido para os t iniciais, tendenciando a uma estabilização, a partir de t_8 (Figura 6A). Mesmo comportamento pode ser observado para d no Solo FAAr, embora a estabilização tenha começado em t_7 (Figura 7A). O comportamento de estabilização é caracterizado pela mudança do regime de infiltração, atingindo o regime permanente ou estável, além da perda energia da água a medida que se distância do ponto de emissão da água, o processo de capilaridade é interrompido ou retardado, além disso, a medida que aumenta o volume aplicado, conseqüentemente aumenta a área a ser umedecida, aumentando o número de poros a serem preenchidos para haver a saturação e assim haver continuidade no processo de expansão. Como os solos estudados são, de modo geral, arenosos, a macroporosidade é predominante, o que facilita a influência da força da gravidade no processo, conseqüentemente, as conexões capilares são menores.

Um comportamento semelhante a Q_1 pode ser observado para Q_2 . O padrão de estabilização do diâmetro é comum para os solos A (Figura 6A) e B (Figura 7A), a partir de t_8 , porém, observa-se que o Solo FAr alcança dimensões maiores, devido a uma menor presença de argila, que possui uma característica de retardar a infiltração devido as interações energéticas químicas com a água, bem como diminuir a seção capilar, aumentar a microporosidade, diminuindo a macroporosidade. Outro fator é o aumento do volume de água aplicado, que provoca uma maior interação entre a capilaridade e a gravidade.

O comportamento do diâmetro para Q_3 segue o padrão das vazões menores, porém é mais acentuada a diferença entre solos. A saturação ocorre mais rápida e ocupa um volume de solo maior, influenciando diretamente na velocidade de crescimento do d.

Tabela 8: Valores médios das variáveis estudadas (cm), partir de uma vazão submetida a uma pressão média de trabalho de 2,5 atm.

Solo	Vazão L h ⁻¹	Dimensões cm	Tempo (min)									
			t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉	t ₁₀
			5	10	15	20	30	40	50	70	90	110
A	2,8	d	13,7	21,3	24,3	28,0	30,8	32,5	38,0	38,3	38,8	39,2
		p	11,0	12,5	13,5	15,5	20,0	20,8	24,5	24,5	32,5	35,7
	4,4	d	22,5	25,2	30,0	34,5	38,3	42,7	45,8	48,0	49,0	55,0
		p	9,0	14,4	15,8	16,8	20,0	26,5	28,3	30,2	37,7	38,3
	8,3	d	21,8	27,5	29,3	37,5	41,5	42,5	47,5	53,5	55,3	58,8
		p	16,0	19,3	24,0	25,5	35,5	37,0	42,7	46,3	49,7	53,7
B	2,8	d	13,3	22,0	22,3	23,3	29,5	30,2	33,0	41,0	42,0	43,0
		p	6,8	11,5	12,3	14,5	20,0	21,5	21,3	26,5	31,3	31,5
	4,4	d	23,0	23,5	25,7	26,5	34,5	36,5	37,7	41,0	44,0	47,0
		p	12,5	15,5	17,5	20,0	23,0	25,3	27,5	32,7	36,0	39,0
	8,3	d	26,5	28,7	33,0	35,3	41,3	42,5	43,0	46,5	55,5	59,0
		p	16,3	20,3	22,7	23,0	24,0	25,5	28,5	39,0	39,5	47,3

V - variáveis estudadas; d – diâmetro; p – profundidade;

Quando analisamos o comportamento de p para os solos FAr e FAAr, tem-se uma maior variação. Segundo Souza (2000), os valores da taxa constante de infiltração são inversamente associados aos da densidade do solo. Quando não há impedimento físico na estrutura do solo (duripan, fragipan, camada impermeável), e quando não há interrupção do fornecimento de água, a tendência da maioria dos solos é aumentar a distância vertical do alcance da água, pela continuidade do processo de infiltração (SOBRINHO, 2003). Para Q_1 no Solo FAr o avanço é crescente (Figura 6B), ou seja, p aumenta com o tempo, porém, um padrão de estabilização é observado para o Solo FAAr (Figura 7B), isso pode se dar pelo baixo volume aplicado de água, não sendo suficiente para que a crescência fosse detectada ou ainda pode existir o fator de irregularidade do sistema de irrigação.

Um comportamento mais regular é encontrado em Q_2 que apresentam um padrão de estabilização de p no decorrer do tempo. O avanço de molhamento vertical (p), em ambos os solos, não diferiram (Figura 6B e Figura 7B).

Quando analisamos a interação d vs p , detectou-se um comportamento semelhante para a maioria dos pontos. O diâmetro tende a estabilizar o crescimento enquanto a profundidade continua a aumentar, no instante que se mantiver o fornecimento de água. Para Q_1 , Q_2 , ambos os solos tendenciaram ao estabelecimento do crescimento de d e continuidade na crescência de p . Como antes citado, houve divergência das dimensões de d , maior para o Solo FAr em relação ao Solo FAAr. Para Q_3 , tanto o Solo FAr quanto o Solo FAAr tendenciaram ao estabelecimento do crescimento de d e continuidade na crescência de p .

As equações de Ismail et al. (2014), ajustadas para o banco de dados extraído pelos sistemas de irrigação apresentaram os seguintes parâmetros:

para o Solo FAr:

$$d = 2,7271 \cdot (K_s^{-0,0817} \cdot Q_1^{0,3606} \cdot T^{0,2789}) \quad \text{(equação 16)}$$

$$p = 1,6180 \cdot (K_s^{-0,1565} \cdot Q_1^{0,2812} \cdot T^{0,4377}) \quad \text{(equação 17)}$$

$$d = 2,9495 \cdot (K_s^{-0,0681} \cdot Q_2^{0,3560} \cdot T^{0,2879}) \quad \text{(equação 18)}$$

$$p = 1,5842 \cdot (K_s^{-0,1883} \cdot Q_2^{0,2706} \cdot T^{0,4589}) \quad \text{(equação 19)}$$

$$d = 2,4752 \cdot (K_s^{-0,0256} \cdot Q_3^{0,3420} \cdot T^{0,3163}) \quad \text{(equação 20)}$$

$$p = 2,0198 \cdot (K_s^{-0,1025} \cdot Q_3^{0,2992} \cdot T^{0,4016}) \quad \text{(equação 21)}$$

para o Solo FAAr:

$$d = 2,4982 \cdot (K_s^{-0,0213} \cdot Q_1^{0,3262} \cdot T^{0,3475}) \quad (\text{equação 22})$$

$$p = 1,3942 \cdot (K_s^{-1,1880} \cdot Q_1^{0,2707} \cdot T^{0,4587}) \quad (\text{equação 23})$$

$$d = 2,6750 \cdot (K_s^{-0,0940} \cdot Q_2^{0,3647} \cdot T^{0,2706}) \quad (\text{equação 24})$$

$$p = 1,6976 \cdot (K_s^{-0,0844} \cdot Q_2^{0,3052} \cdot T^{0,3895}) \quad (\text{equação 25})$$

$$d = 2,5671 \cdot (K_s^{-0,0911} \cdot Q_3^{0,3637} \cdot T^{0,2726}) \quad (\text{equação 26})$$

$$p = 1,6267 \cdot (K_s^{-0,0601} \cdot Q_3^{0,0601} \cdot T^{0,3734}) \quad (\text{equação 27})$$

sendo d o diâmetro da área molhada (m), p a profundidade de infiltração da água (m), K_s é a condutividade hidráulica saturada (m h^{-1}), $Q_{1, 2, 3}$ é a vazão dos emissores ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), T é o tempo de irrigação (h).

A interação entre as propriedades hidrodinâmicas dos solos, obtidas pelo BEST, com as características da irrigação (t e Q) resultaram na calibração dos modelos matemáticos, que resultaram em valores que se aproximam dos valores reais observados. Para tanto, uma vez que se obtêm um desejado volume de solo molhado, diante de uma vazão de um valor de tempo, é possível estimar com precisão as dimensões geométricas e assim, auxiliar no planejamento e dimensionamento de um sistema de irrigação para os solos em questão, ou similares.

As correlações mostram que a relação entre as variáveis é positiva, ou seja, quanto maior forem os valores observados, maiores são os valores estimados, mesmo comportamento obtido por Naglic et al., (2014), porém, com melhores ajustes. A variação entre os valores observados comparados aos estimados foi baixa. Ao analisar os pontos, verificou que a houve grande proximidade entre os resultados observados e estimados, resultando em um erro quadrático baixo, com r^2 variando entre 0,91 e 1,00 para d e p , nos Solo FAr e FAAr. Isso resulta dizer que os modelos matemáticos encontrados são válidos e permitem sua utilização do planejamento e dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento, definindo os espaçamentos entre linhas e emissores.

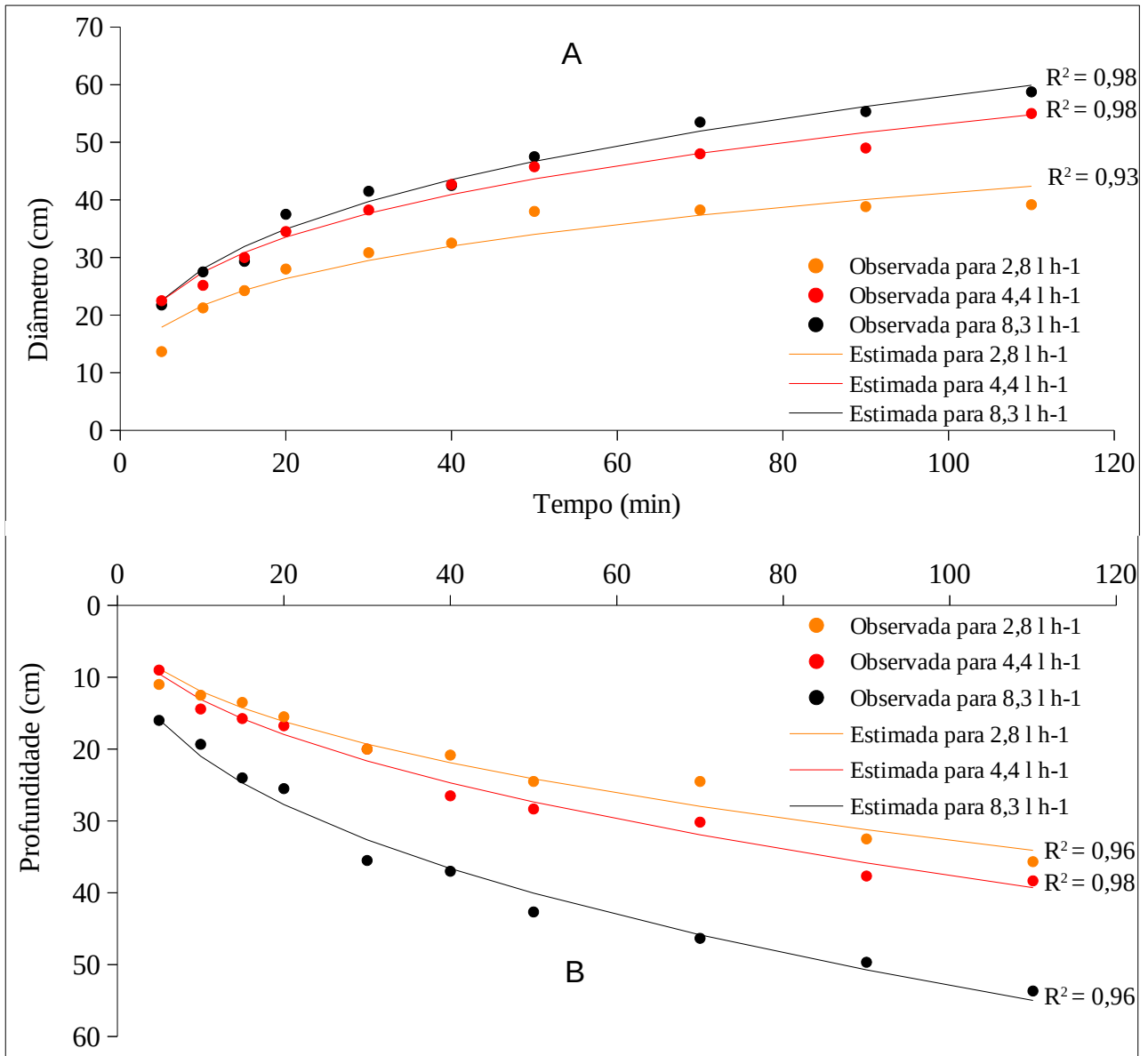


Figura 6: Relação entre o diâmetro observado, diâmetro estimado (A) e a profundidade observada e a profundidade estimada (B) ao longo do tempo no Solo FAr.

Observa-se que há uma proximidade entre as dimensões de d no solo FAr, tanto observadas quanto estimadas, para Q_2 e Q_3 (Figura 6A), já para p , há maior proximidade entre Q_1 e Q_2 . Essa proximidade também é observada no solo FAAr. Para d , a proximidade entre valores é encontrada para Q_1 e Q_2 (Figura 7A) e para p , há uma equidistância entre os valores (Figura 7B).

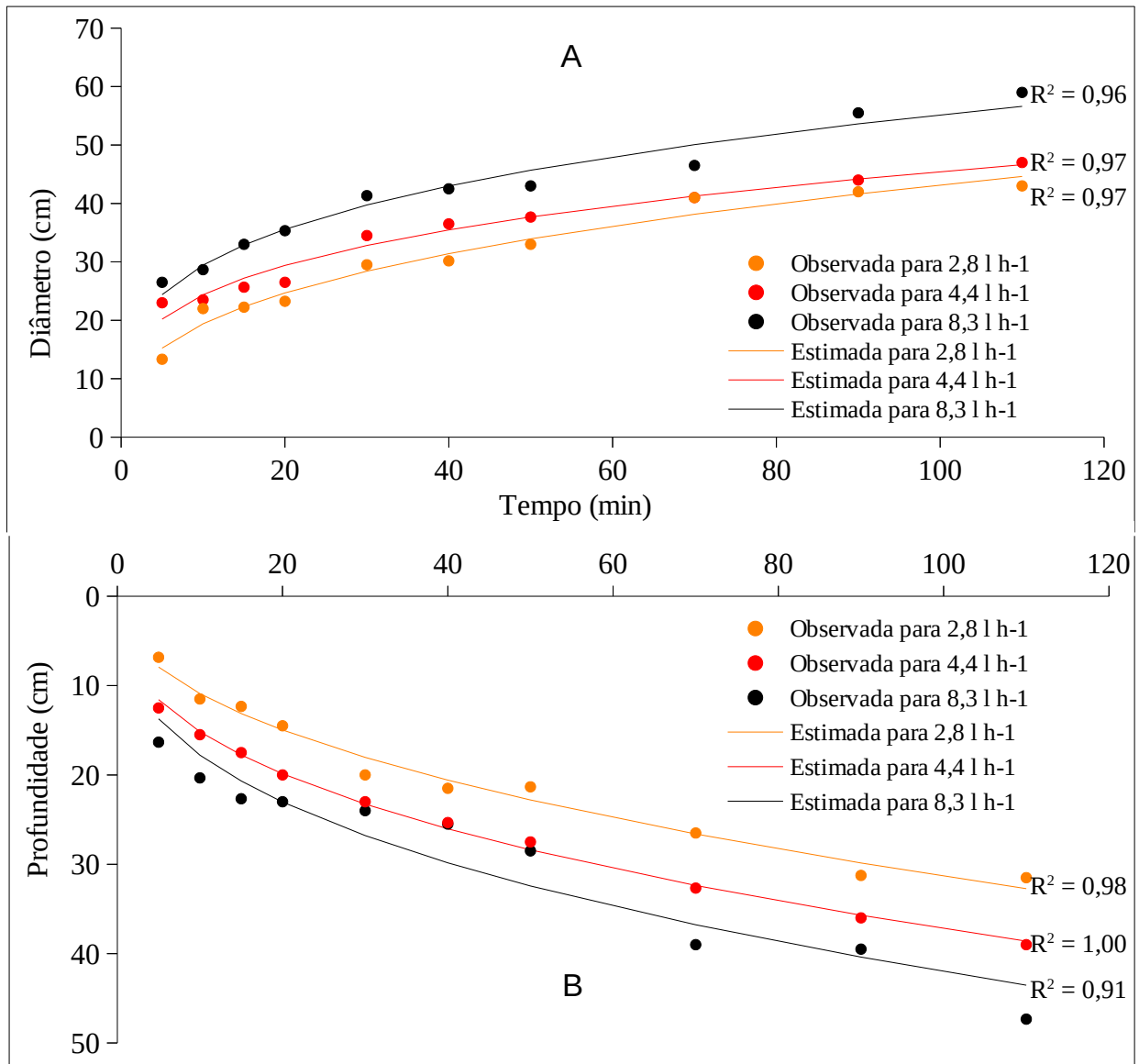


Figura 7: Relação entre o diâmetro observado, diâmetro estimado (A) e a profundidade observada e a profundidade estimada (B) ao longo do tempo no Solo FAAr.

O comportamento da frente molhamento é sempre crescente a medida que avança no tempo, porém, d tende a uma leve estabilização ou redução na velocidade de expansão, enquanto p , tende a continuar a crescer, embora também presente queda na velocidade do avanço. Tal comportamento é encontrado tanto nos valores observados quanto nos valores estimados. O solo FAAr apresenta valores de d e p mais variáveis entre as vazões (Figura 8), enquanto o solo FAAr apresentou valores de d e p mais próximos para as vazões (Figura 9).

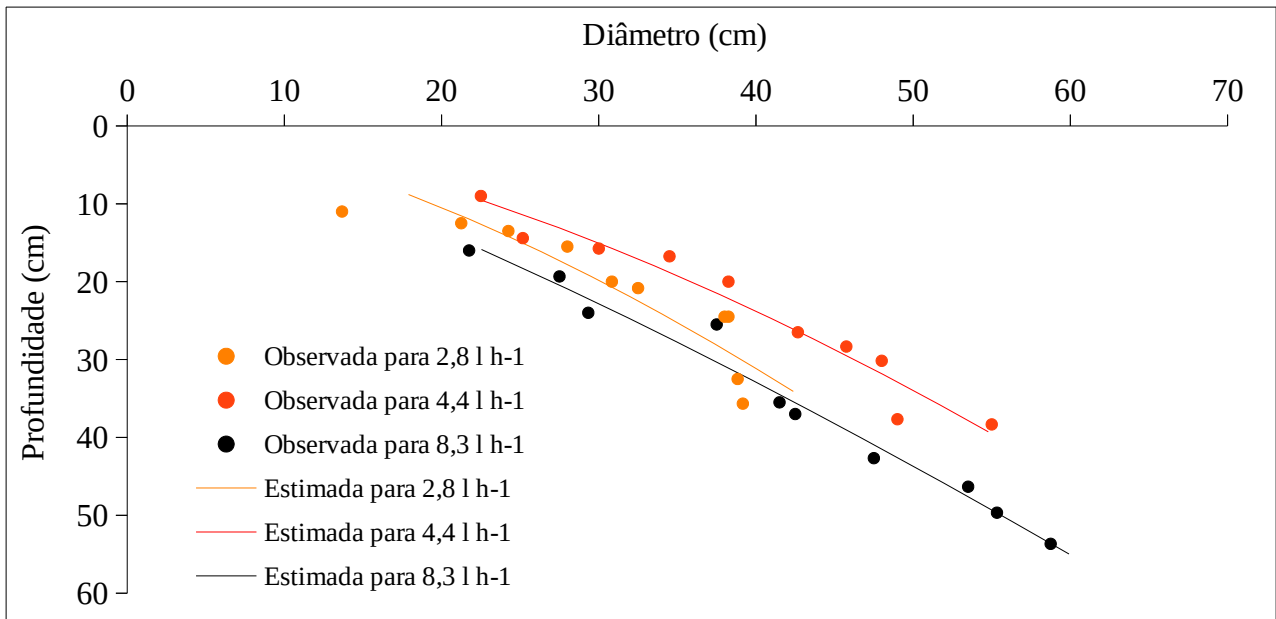


Figura 8: Relação entre diâmetro observado e estimado vs profundidade observada e estimada, para o Solo FAr.

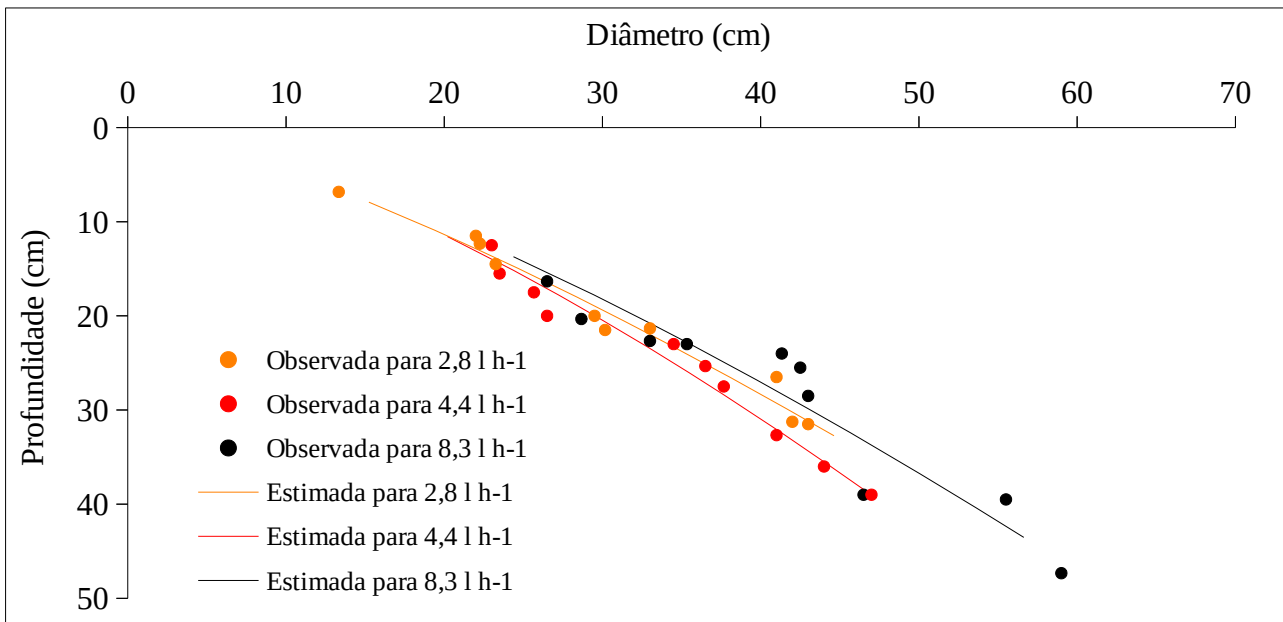


Figura 9: Relação entre diâmetro observado e estimado vs profundidade observada e estimada, para o Solo FAAr.

CONCLUSÕES

- A K_s obtida a partir da metodologia Beerkan aplicada aos modelos propostos permitiu estimar as dimensões geométricas do avanço de água, diâmetro e profundidade.
- As dimensões geométricas estão diretamente relacionadas com K_s do solo e Q dos gotejadores, que adicionados à modelos potenciais em função de T , permite avaliar o comportamento do avanço da água no solo durante uma irrigação.
- Os modelos que descrevem os avanços de água obtiveram bons ajustes, com $R^2 > 0,90$ para os solos estudados. As equações ajustadas podem ser utilizadas para estimar a área e o volume de solos molhados para todas as vazões em qualquer intervalo de tempo.
- Os Solos FAr e FAAr não apresentaram comportamentos da frente de molhamento diferentes para as vazões e tempos estudados, pois apesar de serem de classes texturais próximas, possuíam estruturas diferentes.
- As dimensões alcançadas, para o Solo FAr por Q_3 aos 30 minutos supera as alcançadas por Q_1 aos 110 minutos e Q_2 aos 70 minutos, reduzindo o tempo de irrigação em mais de 80 minutos. Não há necessidade de irrigar com Q_3 por mais de 40 minutos, pois o avanço horizontal e vertical da frente de umedecimento não é expressivo. Para o Solo FAr, as dimensões para Q_1 e Q_2 , aos 110 minutos de irrigação, foram praticamente superadas por Q_3 aos 70 minutos.
- Quando comparado o volume de água utilizado na irrigação, Q_2 apresenta as maiores economias quando analisado segundo as dimensões d e p nos intervalos de tempo necessários para alcançar Q_1 aos 110 minutos, em ambos os solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, N. **NBR 7181**–Solo–Análise granulométrica. Rio de Janeiro/RJ, 1988.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018. Informe Aual. Brasília/DF, 2018. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/portal/publicacao/Conjuntura2018.pdf>>. Acesso em: 23/07/2019, às 13:01hs.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil / Agência Nacional de Águas, Embrapa Milho e Sorgo. - 2. ed. - Brasília/DF: **ANA**, 2019.

ALAGNA, V.; BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; GUAITOLI, F.; IOVINO, M.; KEESSTRA, S.; CERDÀ, A. Using beerkan experiments to estimate hydraulic conductivity of a crusted loamy soil in a Mediterranean vineyard. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, 67(2), 191-200. 2019.

ALEXANDRATOS, S. D.; BARAK, N.; BAUER, D.; DAVIDSON, F. T.; GIBNEY, B. R.; HUBBARD, S. S.; WESTERHOF, P. Sustaining Water Resources: Environmental and Economic Impact. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, Washington/DC, Washington/DC. 2019.

BALDOVINO, J. A.; MOREIRA, E. B.; CARDOSO, A.; MAZZAROLO, J.; DOS SANTOS IZZO, R. L. Análise da ascensão capilar de um Solo FArrenoso. **Anais do Simpósio da Prática de Engenharia Geotécnica** na Região Centro-Oeste, Brasil, 556-562. 2017.

BARRETO, C. V. G.; SAKAI, E.; PIRES, R. C. M.; ARRUDA, F. B. Técnica de avaliação de bulbo úmido por múltiplos cortes em trincheira. **Irriga**, Botucatu/SP, v. 13, n. 02, p. 160-169, 2008.

BARROS, A. C.; FOLEGATTI, M. V.; SOUZA, C. F.; SANTORO, B. L. Distribuição de água no Solo FArplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande/PB, v. 13, n. 6, p. 700-707. 2009.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8 ed. Viçosa/MG: **UFV**, p. 625, 2006.

BERTRAND, A. R. Rate of Water Intake in the Field 1. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling, (methodsofsoilana), 197-209, 1965.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B.; CUNHA FILHO, M.; SOUZA, W. L. S. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um Cambissolo do semiárido do Brasil. **Revista Brasileira De Ciência do Solo**, Vicosa/MG. 34:1325-1332, 2010.

BRAUD, I.; DE CONDAPPA, D.; SORIA, J. M.; HAVERKAMP, R.; ANGULO-JARAMILLO, R.; GALLE, S.; VAUCLIN, M. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method). **European Journal of Soil Science**, Malden/MA, 56(3), 361-374. 2005.

BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation science**, New York/NY, v. 1, n. 1, p. 3-17, 1978.

- BROOKS, R.H.; COREY, C.T. Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Paper, vol. 3. **Colorado State University**, Fort Collins/CO, 1964.
- CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F. L. Água no solo: Parâmetros para o dimensionamento de sistemas de irrigação. Santa Maria/RS. Universidade Federal de Santa Maria/ Departamento de Engenharia Rural, p. 88, 2000.
- CARDOSO, H. E. A.; MANTOVANI, E. C.; COSTA, L. C. As águas da agricultura. **Agroanalysis**. Instituto Brasileiro de Economia/Centro de Estudos Agrícolas. Rio de Janeiro/RJ. p.27-28. 1998.
- COELHO, E. F.; OR, D. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. **Plant and Soil**, Dordrecht/NE, v. 206, n. 02, p. 123-136, 1999.
- COTE, C. M.; BRISTOW, K. L.; CHARLESWORTH, P. B.; COOK, F. J.; THORBURN, P. J. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. **Irrigation science**, New York/NY, v. 22, n. 3-4, p. 143-156, 2003.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Serra Talhada, estado de Pernambuco. Recife/PE. **CPRM/PRODEEM**, p. 12, 2005.
- DASBERG, S.; BRESLER, E. Drip irrigation manual. **International Irrigation Information Center**. 1985.
- DE SOUSA PINTO, C. Curso básico de Mecânica dos Solos. **Oficina de Textos**, 2016.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço nacional de levantamento e conservação de solos. Manual de métodos de análise de solo, 1997.
- FERNANDEZ-GALVEZ, J.; SIMMONDS, L. P. Monitoring and modelling the three-dimensional flow of water under drip irrigation. **Agricultural water management**, Amsterdam/NE, v. 83, n. 3, p. 197-208, 2006.
- FIORIN, T. T. Estimativa da infiltração de água no Solo FAr partir de pedofunções. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, p. 116, 2008.
- FURTUNATO, O. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; OLIVEIRA, L. D. SOUZA, E. S.; MOURA, A. E. S. S. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos de solos em uma bacia experimental no Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre/RS, v. 18, n. 2, p. 135-147, 2013.
- GARDENAS, A. I.; HOPMANS, J. W.; HANSON, B. R.; SIMUNEK, J. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. **Agricultural water management**, Amsterdam/NE, v. 74, n. 3, p. 219-242, 2005.
- GOMES, H. P. Hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento. **Engenharia de irrigação**, João Pessoa/PB. UFPB, p. 344, 1994.

GRAFTON, R. Q.; WILLIAMS, J.; PERRY, C. J.; MOLLE, F.; RINGLER, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R. G. The paradox of irrigation efficiency. **Science**, Washington/DC , v. 361, n. 6404, p. 748-750, 2018.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y.; CUENCA, R.; ROSS, P. J.; STEENHUIS, T. S. Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. Scale dependence and scale invariance in hydrology, 190-223. 1998.

HAMAMI, L.; NASSEREDDINE, B. Integration of Irrigation System with Wireless Sensor Networks: Prototype and Conception of Intelligent Irrigation System. In: **Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science**, San Francisco/SF. v. 1. 2018.

HARTGE, K.H.; HORN, R. Die physikalische Untersuchung von Böden. Ferdinand Enke Verlag, 3. Stuttgart, Auflage, 177p, 1989.

IDROP. Catálogo. 2009. Disponível em:

<http://new.irritec.com/it-IT/wp-content/uploads/sites/2/2013/09/Catalogo_iDrop.pdf>, acesso em: 24/07/2019, às 10:30hs.

ISMAIL, S. M.; EL-ABDEEN, T. Z.; OMARA, A. A.; ABDEL-TAWAB, E. Modeling the soil wetting pattern under pulse and continuous drip irrigation. **American-Eurasian Journal Agricultural & Environment Science**, 14(9), 913-922. 2014.

KANDELOUS, M. M.; SIMUNEK, J. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. **Irrigation science**, New York/NY, v. 28, n. 5, p. 435-444, 2010.

KARMELI, D.; KELLER, J. Trickle irrigation desingn. 1975.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C.A. (Ed.). Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. **American Society of Agronomy**, Madison pt.1, p.253-261, 1965.

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; GOUTALAND, D.; LETELLIER, L.; GAUDE, J. P.; WINIARSKI, T.; DELOLME, C. Effect of the settlement of sediments on water infiltration in two urban infiltration basins. **Geoderma**, Amsterdam/NE, v. 156, n. 3-4, p. 316-325, 2010.

LASSABATERE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA UGALDE, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. **Soil Science Society of America Journal**, Madson/WI, 70(2), 521-532. 2006.

LEPSCH, I. F. Formação e conservação dos solos. **Oficina de textos**, 2016.

LUBANA, P. P. S.; NARDA, N. K. SW-Soil and Water: Modelling Soil Water Dynamics under Trickle Emitters-a Review. **Journal of agricultural engineering research**, Pavia, Italy, v. 78, n. 3, p. 217-232, 2001.

- MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A.; DE MEDEIROS, J. F.; NETO, J. D Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza/CE, v. 41, n. 1, p. 149-158, 2010.
- MALEK, K.; PETERS, R. T. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston/VA, 137(8), 530-536. 2010.
- MANTOVANI, E. C. Programa de avaliação da irrigação por aspersão e localizada. **AVALIA**. Viçosa: UFV, 2001.
- MAPA- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Zoneamento agrícola. Brasília/DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/riscos-seguro/risco-agropecuário/zoneamento-agricola>> acesso em: 23/07/2019, às 12:59 hs.
- MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JUNIOR, O. F.; MARTINS, G. C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Embrapa Amazônia Ocidental**-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2008.
- MUBARAK, I.; MAILHOL, J. C.; ANGULO-JARAMILLO, R.; BOUARFA, S.; RUELLE, P. Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high-frequency drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam/NE, v. 96, n. 11, p. 1547-1559, 2009.
- NAGLIC, B.; KECHAVARZI, C.; COULON, F.; PINTAR, M. Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size. **Irrigation science**, New York/NY, 32(6), 421-436. 2014.
- NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Water quality in drip/trickle irrigation: a review. **Irrigation science**, New York/NY, v. 12, n. 4, p. 187-192, 1991.
- PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande/PB, Campina Grande/PB, v.4, n.3, p.465-473, 2000.
- PEEL, M. C. FINLAYSON, B. L. & MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and earth system sciences discussions**, 4(2), 439-473. 2007.
- PHILIP, J. R. Travel times from buried and surface infiltration point sources. **Water resources research**, Washington/DC, v. 20, n. 7, p. 990-994, 1984.
- PUY, A.; GARCÍA AVILÉS, J. M.; BALBO, A. L. KELLER, M.; RIEDESEL, S.; BLUM, D.; BUBENZER, O. Drip irrigation uptake in traditional irrigated fields: The edaphological impact. **Journal of Environmental Management**, London/LW1. 2016.
- REVOL, P.; CLOTHIER, B. E.; MAILHOL, J. C.; VACHAUD, G.; VAUCLIN, M. Infiltration from a surface point source and drip irrigation: 2. An approximate time-dependent solution for wet-front position. **Water Resources Research**, Washington/DC, v. 33, n. 8, p. 1869-1874, 1997.

- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2018.
- RICHARDS, L. Physical Condition of Water in Soil 1. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling, (methodsofsoilana), 128-152. 1965.
- SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston/VA, v. 112, n. 3, p. 242-253, 1986.
- SKAGGS, T. H.; TROUT, T. J.; ROTHFUSS, Y. Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water. **Soil Science Society of America Journal**, Madson/WI, v. 74, n. 6, p. 1886-1896, 2010.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília/DF. v. 32, n. 2, p. 213-220. 1997.
- SMETTEM, K.R.J.; CLOTHIER, B.E. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multi-disc permeameters. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.40, p.563-568, 1989.
- SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C.; SOUZA, L. C. D.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. D. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande/PB. 7(2), 191-196. 2003.
- SOUZA, C. F. A utilização da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na modelagem do bulbo molhado no solo irrigado por gotejamento. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. **Tese de Doutorado**. p. 115, 2002.
- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande/PB. 2004.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C.; ANGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Hydrodynamic characterization of soils: application of the Beerkan method. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande/PB, v. 12, n. 2, p. 128-135, 2008.
- SOUZA FILHO, P. D. S.; HELDWEIN, A. B.; ZAMBERLAN, J. F.; CORRÊA, H. C. Parâmetros físicos do solo relacionados com o avanço da frente de molhamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande/PB, v. 17, n. 2, 2013.
- SUBBAIAH, R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. **Irrigation science**, New York/NY, v. 31, n. 3, p. 225-258, 2013.
- TAVARES FILHO, J. Física do solo e conservação do solo e água. **SciELO-EDUEL**, 2016.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. Brasília/DF: **Embrapa Solos**. 2017.
- TOLENTINO JÚNIOR, J. B.; MARINHO, L. B.; SOUZA, C. F.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de um modelo numérico para modelagem do bulbo molhado em irrigação por gotejamento. **Irriga** Botucatu/SP. v. 1, n. 1, p. 11, 2018.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil science society of America journal**, Madson/WI, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. Localized irrigation. **FAO Irrigation and Drainage Paper 36**, FAO-UN, Rome, Italy. 1884.

WWAP - UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAM. The united nations world water development report 2014. **Water and Energy**, 2014.

ANEXOS

Códigos R

```
# DIRETORIO DE TRABALHO -----
setwd('~/')
# DADOS -----
dis = read.table('arquivo.txt', h=T) #arquivo de dados
# ajustes -----
Ks = '?' # Condutividade hidráulica saturada (m/h) '?' valor de Ks em mm/h
Qc = '?' # Vazão do emissor (m3/h) '?' valor da vazão
piz1=dis$P*sqrt(Ks/Qc) #P = profundidade (Nome da Coluna)
piz2=dis$T*sqrt((Ks^3)/Qc) #T = Tempo (Nome da Coluna)
y<-piz1
x<-piz2
xt<-dis$T
# FUNCAO -----
# OBTENÇÃO DO Z versus profundidade
aj = function(x, a, b){
  return(a*(x^b))
}
plot(x, y, xlab = 'piz2', ylab = 'piz1')
fit1 = nls(y~aj(x, a, b), start=list(a = 0.2, b = 0.2))
summary(fit1)
CFS = coef(fit1)
b1<-CFS[c(0,2)]
a1<-CFS[c(1,0)]
c1=(b1*(3/2))-(1/2)
c2=(b1*(-1/2))+(1/2)
z=a1*((Ks^c1)*(Qc^c2)*(xt^b1))
#-----
pid1=dis$D*sqrt(Ks/Qc) #D = Diametro (Nome da Coluna)
pid2=dis$T*sqrt((Ks^3)/Qc) #T = Tempo (Nome da Coluna)
y1<-pid1
x1<-pid2
xt<-dis$T
# FUNCAO -----
```

```

# OBTENÇÃO DO D versus diâmetro
aj2 = function(x1, f, g){
  return(f*(x1^g))
}
plot(x1, y1, xlab = 'pid2', ylab = 'pid1')
fit3 = nls(y1~aj2(x1, f, g), start=list(f = 0.2, g = 0.2))
summary(fit3)
CFS3 = coef(fit3)
h1<-CFS3[c(0,2)]
i1<-CFS3[c(1,0)]
j1=(h1*(3/2))-(1/2)
j2=(h1*(-1/2))+(1/2)
d=i1*((Ks^j1)*(Qc^j2)*(xt^h1))

```