

EDCÁSSIO DIAS ARAÚJO

**USO DE HIDROGEL E APLICAÇÃO DE ESGOTO SANITÁRIO POR
GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL NO CULTIVO DO FEIJÃO-CAUPI**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Fernando França da Cunha

Coorientador: Alisson Carraro Borges

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A663u Araújo, Edcássio Dias, 1991-
2021 Uso de hidrogel e aplicação de esgoto sanitário por
 gotejamento subsuperficial no cultivo do feijão-caupi / Edcássio
 Dias Araújo. – Viçosa, MG, 2021.
 1 dissertação eletrônica (124 f.): il. (algumas color.).

 Orientador: Fernando França da Cunha.
 Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
 Departamento de Engenharia Agrícola, 2021.
 Referências bibliográficas: f.38-41.
 DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.046>
 Modo de acesso: World Wide Web.

 1. Feijão-caupi - Irrigação. 2. Hidrogéis. 3. Irrigação por
 gotejamento. I. Cunha, Fernando França da, 1980-.
 II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
 Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
 III. Título.

CDD 22. ed. 633.37287


EDCÁSSIO DIAS ARAÚJO

**USO DE HIDROGEL E APLICAÇÃO DE ESGOTO SANITÁRIO POR
GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL NO CULTIVO DO FEIJÃO-CAUPI**


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 30 de julho de 2021

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 EDCASSIO DIAS ARAUJO
Data: 08/02/2024 11:53:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Edcássio Dias Araújo
Autor

Documento assinado digitalmente
 FERNANDO FRANCA DA CUNHA
Data: 08/02/2024 13:31:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fernando França da Cunha
Orientador

A minha esposa Francielle de Matos Feitosa e filha Melissa Feitosa Dias, aos meus pais José de Souza Araújo e Ilda Antunes Dias Araújo, e aos meus irmãos William Dias Araújo e Lays Dias Araújo, por todo apoio e incentivo.

Aos meus amigos que participaram direta e indiretamente dessa jornada. E a Deus por sempre me iluminar e me dar forças nos momentos que eu mais necessitava.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo dom da vida.

A Universidade Federal de Viçosa, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização desse curso e apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Fernando França da Cunha, pela orientação, ensinamentos, conselhos, confiança e por sua empatia, que sempre serei grato.

Ao professor Alisson Carraro Borges, pelas contribuições ao longo da minha trajetória acadêmica e apoio na transição do mestrado para o doutorado.

A minha esposa Francielle e minha filha Melissa, por serem meu combustível diário.

Aos funcionários Policarpo, Chicão e Gil, e estagiários Antônio e Willian, pelos cafés e contribuições para realização dessa pesquisa.

Aos amigos Lucas Borges, Miquéias Assis e Pablo Alves, pelas contribuições nos experimentos.

Aos amigos da Igreja Presbiteriana de Viçosa, em especial ao grupo de pais do Devocional, que por meio dos encontros das quartas-feiras, tornaram essa trajetória mais leve e divertida.

Aos amigos que herdei de Fran, pelos vários encontros de mesversário e demais ocasiões, pela ajuda e suporte nessa jornada de crescimento profissional e pessoal.

E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

BIOGRAFIA

EDCÁSSIO DIAS ARAÚJO, filho de José de Souza Araújo e Ilda Antunes Dias Araújo, nasceu em Monte Azul – Minas Gerais, em 03 de abril de 1991.

No ano de 2008 concluiu o ensino médio em concomitância com o curso de Técnico em Agropecuária pela Escola Agrotécnica Federal de Salinas, atual Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, *Campus* Salinas – MG.

Iniciou o Curso de Agronomia em agosto de 2010, na Universidade Estadual de Montes Claros, *Campus* I Janaúba - MG, concluindo em julho de 2015.

Em julho de 2015, iniciou, na Universidade Federal de Viçosa, o Mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, concluindo-o em fevereiro de 2017.

Em março de 2017, iniciou, na Universidade Federal de Viçosa, o Doutorado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. Submeteu-se à defesa de tese em 30 de julho de 2021.

RESUMO

ARAÚJO, Edcássio Dias, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2021. **Uso de hidrogel e aplicação de esgoto sanitário por gotejamento subsuperficial no cultivo do feijão-caupi**. Orientador: Fernando França da Cunha. Coorientador: Alisson Carraro Borges.

A disponibilidade de água em quantidade e/ou qualidade já é um problema atual, dessa forma é importante procurar estratégias para diminuir a demanda por água tratada, aumentar a produção de alimentos e ao mesmo tempo melhorar a eficiência no uso da água. Nesse sentido, o uso de hidrogel é uma alternativa para aumentar à capacidade de retenção de água no solo e conseqüentemente a água disponível para as plantas. O uso de esgoto sanitário (ES) na agricultura é uma estratégia promissora, a qual possibilita reduzir o consumo de água, diminuir a poluição e preservar os recursos hídricos, disponibilizar água e nutrientes para as plantas e reciclar nutrientes para o solo. A disposição de ES no cultivo do feijão-caupi é promissora, pois é uma cultura de ciclo curto, baixa exigência hídrica e tem tolerância a salinidade do solo. Os sistemas de irrigação por gotejamento são reconhecidos como mais eficientes e seguros para a disposição de ES, pois evitam o contato direto do ES com a parte aérea das plantas, reduzindo as chances de contaminação do ambiente, operador e consumidor. É imprescindível o estudo de técnicas alternativas e mais sustentáveis de produção agrícola, como a aplicação de hidrogel e de ES no estabelecimento do feijão-caupi. A aplicação de ES por meio de irrigação por gotejamento subsuperficial (GSS) contribui para mitigação dos problemas atuais de disponibilidade de água versus produção de alimento. Os experimentos foram conduzidos na Universidade Federal de Viçosa. O primeiro trabalho constituiu pela combinação de oito doses de hidrogel (Agrogel®) e duas fontes de hidratação, com quatro repetições. As doses foram de 0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12 e 0,14% de hidrogel no substrato seco. As fontes de hidratação foram o esgoto sanitário sintético (ESS) e a água destilada (AD). Observou-se que a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a água disponível no substrato aumentam com as doses crescentes de hidrogel nos substratos hidratados com água destilada ou esgoto sanitário sintético. O hidrogel aplicado próximo das sementes afetam negativamente a emergência do feijão-caupi. Para os experimentos com a aplicação de ESS em diferentes profundidades de GSS

no cultivo do feijão-caupi, as parcelas experimentais consistiram nos seguintes tratamentos: T1: vazão de 1,6 L h⁻¹ e T2: 3,8 L h⁻¹. As subparcelas foram compostas pelas seguintes profundidades de instalação do gotejo, S0: 0; S1: 5; S2: 10; S3: 15; S4: 20; S5: 25 e S6: 30 cm. Verificou-se que a emergência das plantas de feijão-caupi é comprometida com o aumento da profundidade de instalação dos gotejadores, assim como, as variáveis fisiológicas e o desenvolvimento das raízes do feijão-caupi fertirrigado com ESS. Além disso, o aumento da profundidade de instalação do gotejador afetou negativamente a produção de grãos e o desenvolvimento vegetativo do feijão-caupi. Em relação, as variáveis químicas do solo, a fertirrigação com ESS em profundidade incrementa a concentração de P, K, Ca e Mg no solo, e a concentração de sódio no solo é menor para as maiores profundidades de instalação dos gotejadores.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*. Água Disponível. Nutrientes. Emergência. Fósforo.

ABSTRACT

ARAÚJO, Edcássio Dias, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2021. **Use of hydrogel and application of municipal wastewater by subsurface dripping in cowpea cultivation.** Advisor: Fernando França da Cunha. Co-advisor: Alisson Carraro Borges.

The availability of water in quantity and/or quality is already a current problem, so it is important to look for strategies to reduce the demand for treated water, increase food production and at the same time improve water use efficiency. In this sense, the use of hydrogel is an alternative to increase the water retention capacity of the soil and consequently the water available for plants. The use of municipal wastewater (MWW) in agriculture is a promising strategy, which makes it possible to reduce water consumption, reduce pollution and preserve water resources, make water and nutrients available to plants and recycle nutrients into the soil. The use of MWW in cowpea cultivation is promising because it is a short-cycle crop with low water requirements and tolerance to soil salinity. Drip irrigation systems are recognized as the most efficient and safest way of disposing of MWW, as they avoid direct contact between MWW and the aerial part of the plants, reducing the chances of contamination of the environment, operators and consumers. It is essential to study alternative and more sustainable agricultural production techniques, such as the application of hydrogel and MWW in the establishment of cowpeas. The application of MWW through subsurface drip irrigation (SDI) helps to mitigate the current problems of water availability versus food production. The experiments were conducted at the Universidade Federal de Viçosa. The first experiment consisted of a combination of eight doses of hydrogel (Agrogel®) and two hydration sources, with four replicates. The doses were 0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12 and 0.14% hydrogel in the dry substrate. The hydration sources were MWW and distilled water (DW). It was observed that field capacity, permanent wilting point and available water in the substrate increased with increasing doses of hydrogel in substrates hydrated with distilled water or synthetic MWW. Hydrogels applied close to the seeds negatively affect the emergence of cowpeas. For the experiments with the application of synthetic MWW at

different SDI depths in cowpea cultivation, the experimental plots consisted of the following treatments: T1: flow rate of 1.6 L h⁻¹ and T2: 3.8 L h⁻¹. The sub-plots were made up of the following drip installation depths: S0: 0; S1: 5; S2: 10; S3: 15; S4: 20; S5: 25 and S6: 30 cm. It was found that the emergence of cowpea plants is compromised by increasing the installation depth of the drippers, as are the physiological variables and root development of cowpeas fertigated with synthetic MWW. Furthermore, increasing the dripper installation depth negatively affected grain production and the vegetative development of the cowpea. With regard to the chemical variables of the soil, fertigation with synthetic MWW at depth increases the concentration of P, K, Ca and Mg in the soil, and the concentration of sodium in the soil is lower for the greater depths of dripper installation.

Keywords: *Vigna unguiculata*. Available water. Nutrients. Emergence. Phosphorus.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	13
2 REFERÊNCIAS	20
CAPÍTULO 1: HIDROGEL E ESGOTO SANITÁRIO NA EMERGÊNCIA DO FEIJÃO-CAUPI: REDUÇÃO OU ELEVAÇÃO DA RESTRIÇÃO HÍDRICA?	25
RESUMO	25
ABSTRACT.....	26
1. INTRODUÇÃO	27
2. MATERIAL E MÉTODOS	29
2.1. Área e delineamento experimental.....	29
2.2. Avaliação da curva de retenção de água no substrato	30
2.3. Avaliação dos atributos químicos do substrato.....	30
2.4. Emergência e desenvolvimento inicial de plântulas	30
2.5. Teor relativo de água	31
2.6. Análises estatísticas.....	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.1. Retenção de água no substrato	33
3.2. Condutividade elétrica, SDT e pH do substrato	37
3.3. Emergência e desenvolvimento inicial de plântulas	40
3.4. Comprimento da parte aérea e conteúdo de água das plântulas	44
4. CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS	49
CAPÍTULO 2: GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL PARA FERTIRRIGAÇÃO DO FEIJÃO-CAUPI COM ESGOTO SANITÁRIO	53
RESUMO	53
ABSTRACT.....	54
1. INTRODUÇÃO	55
2. MATERIAL E MÉTODOS	58
2.1 Condições locais dos experimentos.....	58
2.2 Tratamentos e delineamento experimental	58
2.3 Manejo de solo e água.....	59
2.4 Emergência do feijão-caupi.....	61
2.5 Desenvolvimento e produtividade do feijão-caupi	62
2.5.1 Desenvolvimento e variáveis produtivas	62

2.5.2	Fisiologia do feijão-caupi	63
2.5.3	Desenvolvimento do sistema radicular	64
2.6	Análises estatísticas.....	64
3	RESULTADOS	66
3.1	Emergência do feijão-caupi.....	66
3.2	Desenvolvimento e produção do feijão-caupi.....	67
3.3	Fisiologia do feijão-caupi.....	70
3.4	Desenvolvimento do sistema radicular	75
3.5	Componentes principais e análise de agrupamento.....	77
4	DISCUSSÃO	79
5	CONCLUSÕES	84
	REFERÊNCIAS	85
	CAPÍTULO 3: IMPACTOS NO SOLO E EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI FERTIRRIGADAS COM ESGOTO SANITÁRIO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL	89
	RESUMO	89
	ABSTRACT.....	90
1.	INTRODUÇÃO	91
2.	MATERIAL E MÉTODOS	93
2.1	Condições locais do experimento.....	93
2.2	Tratamentos e delineamento experimental	93
2.3	Condução do experimento	94
2.4	Avaliações experimentais.....	97
2.4.1	Componentes produtivos e emissões de CO ₂ e água.....	97
2.4.2	Análises químicas do solo	98
2.5	Análises estatísticas.....	98
3.	RESULTADOS	100
3.1	Componentes produtivos e emissões de CO ₂ e água	100
3.2	Fósforo, potássio e sódio	102
3.3	Cálcio, magnésio e índice de saturação por sódio	106
3.4	Potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, acidez potencial e saturação por base	108
3.5	Componentes principais e análise de agrupamento	111
4.	DISCUSSÃO	113
5.	CONCLUSÃO.....	119

REFERÊNCIAS	120
CONCLUSÕES GERAIS.....	123

1 INTRODUÇÃO GERAL

O volume total de água no mundo permanece estável, cerca de 75% do planeta é coberto por água (líquida, gasosa e congelada). No entanto, mais de 95% é composta por água salgada, 0,06% da água doce está facilmente disponível (Ahuja, 2014) e apenas 0,01% da água doce está presente em rios e lagos (Odlare, 2014).

Os recursos hídricos são distribuídos irregularmente no espaço e no tempo e estão sob pressão devido ao crescimento populacional e o desenvolvimento econômico (Voulvoulis, 2018). Grandes quantidades de água doce são utilizadas anualmente por setores como a agricultura, urbanização, indústria e mineração. Assim, para apoiar o desenvolvimento global, os recursos hídricos existentes precisam ser gerenciados de forma sustentável para mitigar problemas com a escassez de água (Odlare, 2014).

As causas da escassez de água são uma combinação de vários problemas: redes de distribuição de água ineficientes, nenhum plano de emergência para enfrentar a redução das chuvas, tratamento ineficiente de águas residuárias, degradação dos recursos ambientais e mudanças climáticas (Urbano et al., 2017). Estima-se que em 2025 mais de 60% da população mundial passará por uma restrição ao acesso a água (FAO, 2020), seja por quantidade ou qualidade.

Em relação ao consumo de água pelos diversos setores, a agricultura é considerada por muitos a “vilã” na retirada de água doce, pois representa 50% do uso (ANA, 2021). A agricultura e os sistemas alimentares são parcialmente responsáveis pelas mudanças climáticas, mas também fazem parte da solução. Atualmente 815 milhões de pessoas no mundo estão desnutridas e até 2050 será necessário produzir 49% a mais de alimentos em relação a 2012, devido ao crescimento populacional e mudanças nos hábitos alimentares (FAO, 2017).

Para enfrentar este problema, é importante procurar estratégias para diminuir a demanda por água potável em todos os setores: distribuição de energia, irrigação, demanda doméstica e industrial. A agricultura irrigada é responsável por 40% da produção mundial de alimentos e até 84% em produção econômica (FAO, 2017). Diante do exposto, é necessário adotar técnicas que possibilite aumentar a produção de alimentos e ao mesmo tempo melhorar a eficiência no uso da água, assim como

possibilitar o uso de águas de menor qualidade e destinar a água potável para os setores mais nobres.

Nesse sentido, o uso de hidrogel é uma alternativa promissora para aumentar à capacidade de retenção de água no solo e conseqüentemente a água disponível para as plantas (Pereira, Olszewski & da Silva, 2018). O hidrogel possibilita menores consumos hídricos pelas plantas devido à liberação controlada da água do solo para a atmosfera (Satriani, Catalano & Scalcione, 2018).

Além da redução da demanda hídrica, faz-se necessário também a busca por estratégias que minimizem a poluição dos corpos hídricos. O uso de esgoto sanitário (ES) na agricultura é uma estratégia promissora de disposição final, no qual possibilita reduzir o consumo de água doce, diminuir a poluição de corpos d'água, preservar os recursos hídricos, disponibilizar água e nutrientes para as plantas e reciclar nutrientes para o solo (Elgallal, Fletcher & Evans, 2016).

Associando a aplicação de hidrogel com ES é possível produzir mais e de forma sustentável, ou seja, potencializar a eficiência do uso da água. No entanto, a aplicação de novas técnicas na agricultura deve ser criteriosa. A aplicação de hidrogel e ES proporcionam efeitos positivos nas características físicas e químicas do solo e no desenvolvimento das culturas (Jasim, Saththasivam, Loganathan, Ogunbiyi & Sarp, 2016; Santos, Carvalho, Souza & Medici, 2015). Entretanto, essas técnicas em conjunto podem provocar a salinização do solo (Carvalho et al., 2019; Leuther, Schlüter, Wallach & Vogel, 2019) e, conseqüentemente, uma restrição hídrica nas fases iniciais de germinação e emergência de plântulas. É oportuno ressaltar que são nessas fases que o estande de plantas é garantido, impactando na produtividade e rentabilidade das lavouras comerciais.

A utilização de ES é uma prática antiga, e o conhecimento sobre este tema evoluiu e avançou em toda história humana. O ES foi utilizado para irrigações por civilizações pré-históricas desde a idade do Bronze (aproximadamente 3200 – 1100 aC) (Angelakis; Snyder, 2015). As civilizações gregas e romanas usavam o ES nos campos agrícolas dos perímetros das principais cidades (Atenas e Roma), para serem utilizadas como fertilizantes para culturas e pomares (Tzanakakis; Paranychianaki; Angelakis, 2007). Entre os anos de 1550 e 1700, a disposição de ES em campos agrícolas foi ampliado para fazendas na Alemanha, Escócia e Inglaterra (Tzanakakis et al., 2014).

A reutilização de ES é uma prática generalizada em muitas zonas áridas e semiáridas. Contudo, a gestão inapropriada da irrigação com ES pode representar riscos substanciais para a saúde pública e o ambiente circundante como resultado de seus componentes químico e biológicos (Pedrero et al., 2010; Elgallal; Fletcher; Evans, 2016; Jasim et al., 2016).

Conhecendo os benefícios e riscos associados à disposição agrícola, é possível por meio das pesquisas científicas adotar estratégias de manejo que maximize os pontos positivos desta prática. Comprovando os benefícios ambientais e o aumento da disponibilidade de um recurso escasso, possibilita que as autoridades brasileiras de gestão de água regulamentem esta prática. A disposição agrícola de ES em quantidades e no momento adequado proporciona melhorias nas condições químicas (Biswas; Mojid; Wyseure, 2017; Urbano et al., 2017), físicas (Mathan, 1994) e biológicas do solo.

Os benefícios do reuso não está apenas nas alterações positivas, mas também na manutenção das condições físico-químicas e a não contaminação do solo. Garantindo assim, uma prática sustentável do ponto de vista produtivo, ambiental e social. De acordo com Urbano et al. (2017), o ES não prejudicou as propriedades físicas do solo e aumentou seus nutrientes. Além disso, não foi observada contaminação mineral nos solos devido à irrigação com ES (Almuktar; Scholz, 2016). Portanto, vale ressaltar que esses benefícios variam em função das características e composição do ES, dos seus níveis de tratamentos, do tipo e textura do solo (Fathi; Mirzanejad, 2014). Assim como, variam conforme as estratégias de manejo adotadas para mitigar os problemas com a disposição.

A aplicação controlada de ES em cultivos agrícolas é relatada na literatura como uma estratégia benéfica para elevar os macros e micronutrientes do solo e com isso possibilitar um melhor desenvolvimento das plantas. Esses benefícios foram observados para o crescimento vegetativos do feijão-comum (Saffari; Saffari, 2013), resultando em maiores números de ramos, vagens e folhas (Fatael; Kelvin; Karoli, 2018). O bom desenvolvimento vegetativo promovido pelas melhorias edáficas com a disposição de ES, resulta posteriormente em maiores rendimentos. Com esta prática, é relatado na literatura aumento na produtividade de diversas culturas, como o capim-tifton (Nogueira et al., 2013), a alface (Urbano et al., 2017), cana-de-açúcar (Gonçalves et al., 2017), feijão-comum (Saffari; Saffari, 2013; Fatael; Kelvin; Karoli,

2018), trigo, feijão-da-china, espinafre, feno-grego e trigo-de-alexandria (Singh; Deshbhratar; Ramteke, 2012).

Além das melhorias nos parâmetros de desenvolvimento e produtividade, é relatado melhorias nutricionais, como aumento no teor de proteína bruta do capim-tifton (Nogueira et al., 2013), maiores teores de nitrogênio, fósforo, potássio, zinco, cobre e manganês nos grãos e folhas do feijoeiro-comum, sem atingir níveis tóxicos (Saffari; Saffari, 2013) comprovando assim o efeito nutricional do ES.

A disposição de ES sem controle da quantidade e qualidade propiciam a longo prazo efeitos maléficis para as condições físico-químicas e biológicas do solo, e em alguns casos os problemas ocasionados com essa prática são irreversíveis. A salinização do solo é um termo que inclui solos salinos e sódicos (Van Beek; Tóth, 2012), sendo definidos como, elevada concentração de sais e sódio. Os efeitos da salinização do solo leva à alterações microbiológicas do solo (Smith et al., 2015), bioquímica (Decock et al., 2015), hidrológica (Keesstra et al., 2012) e erodibilidade (Berendse et al., 2015).

A aplicação de ES ao longo do tempo e principalmente quando visa suprir a demanda hídrica da cultura, pode provocar acúmulos de sais e sódio (Lal, 2009; Xu et al., 2010; Santos et al., 2017; WWAP, 2017) e com isso desestruturar o solo (Ghafoor et al., 2011; WWAP, 2017). O ES quando apresenta uma razão de adsorção de sódio (RAS) maior ou igual a 3, tem potencial para causar sodicidade no solo. E a dispersão de argila, que resulta em problemas de permeabilidade e de aeração, podem ocorrer quando a RAS do efluente é maior que 6 (Hanjra et al., 2012). Os constituintes solúveis presentes nos ES's tratados ou não tratados, podem atingir níveis ao longo do tempo que possivelmente tornam-se tóxicos para plantas (Muyen; Moore; Wrigley, 2011). Uma das formas de garantir uma maior eficiência no uso da água e realizar uma aplicação segura de ES é a escolha adequada do sistema de irrigação.

A aplicação de ES pode ser feita de várias formas: via superfície (sulcos, faixas, inundação), por aspersão e gotejamento. A escolha do sistema de aplicação deverá levar em consideração os riscos sanitários, além da economia, eficiência, manutenção e operação do sistema (Matos; Matos, 2017).

O sistema de irrigação por gotejamento é reconhecido como mais eficiente e seguro para a disposição de ES, pois evita o contato direto do ES com a parte aérea

das plantas, reduzindo as chances de contaminação do ambiente, operador e consumidor (Santos et al., 2016).

O sistema de irrigação por gotejamento pode ser dividido entre irrigação de superfície (GS) e irrigação de subsuperfície (GSS). O GS apresenta alto potencial de eficiência de irrigação (85%~95%) em nível de campo. Já a irrigação por GSS possui, adicionalmente, outras vantagens, tais como, redução de plantas daninhas, diminuição da perda de água devido à evaporação do solo (Nogueira et al., 2021), maior segurança na aplicação de águas residuárias (Liu et al., 2021) e rendimentos iguais ou superiores as culturas irrigadas por GS (Ma et al., 2020; Martínez-Gimeno et al., 2018; Selim et al., 2009).

Apesar dos benefícios conhecidos da irrigação por GSS, os sistemas subterrâneos podem em algumas situações não garantir a germinação e o estabelecimento das plantas. Além disso, o aumento da profundidade do emissor implica na diminuição dos rendimentos em algumas culturas e tipos de solo. Bozkurt e Mansuroglu (2018) verificaram que o *Phaseolus vulgaris* L. cultivado em casa de vegetação e irrigado com GSS instalado a 10 cm de profundidade apresentou uma produtividade superior ao tratamento com o GSS a 20 cm de profundidade.

Bhattarai et al. (2008) relataram uma redução do rendimento da soja com o aumento da profundidade do emissor ao longo da faixa de 5-35 cm. Os autores justificaram que o GSS em maior profundidade, particularmente em solos argilosos, induz a deficiência de oxigênio na rizosfera e reduz o volume de raiz, impondo uma restrição sobre a habilidade da planta em extrair água e nutrientes. Assim, percebe-se a importância de definir a melhor profundidade de instalação dos gotejadores em sistema subsuperficial.

A profundidade ideal do emissor é variável para o tipo de solo, cultura e, possivelmente, vazão do emissor. É consenso na literatura que o aumento da vazão dos gotejadores provoca acréscimos no tamanho de bulbo molhado em sistemas de irrigação por GS (Souza et al., 2018; Bernardo et al., 2019; Silva et al., 2020). Entretanto, em relação ao bulbo molhado e ascensão da água no perfil do solo em sistemas por GSS, ainda não existe um consenso sobre a influência das vazões dos emissores. Existem estudos evidenciando que maiores vazões dos gotejadores aumentam a ascensão da água no perfil do solo (Vásquez et al., 2017, Nogueira et al., 2021) e outros estudos não mostram diferença (Elaiuy et al., 2015, Nazari et al.,

2021). Além disso, os estudos que existem são com água de boa qualidade, que em relação ao ES, podem apresentar comportamentos diferentes quanto a ascensão capilar.

De uma maneira geral, os nutrientes do solo e as raízes das principais culturas são distribuídos, principalmente, na camada de 0-20 cm do solo. Portanto, a falta de água nesta profundidade pode afetar a mineralização e a disponibilidade de nutrientes no solo (Lamm, 2014), especialmente para o fósforo (P) e o potássio (K), cujos movimentos no solo ocorrem principalmente por difusão (Wu et al., 2019). Diante disso, mudanças na dinâmica da umidade do solo, da temperatura, do pH, e nutrientes, são indicadores eficazes da qualidade do solo (Wang et al., 2018).

Considerando a importância do uso de hidrogel e a disposição segura de ES via GSS, é interessante associar seus estudos com culturas de importância econômica e social, como por exemplo, o feijão-caupi, produzido principalmente na região Nordeste do Brasil. A *Vigna unguiculata*, popularmente conhecido como feijão-caupi, feijão-de-corda, feijão-fradinho, feijão-frade, feijão-miúdo ou feijão-macassar, é uma leguminosa muito nutritiva e apreciada em várias regiões brasileiras. É uma cultura muito versátil em relação ao cultivo, comercialização e forma de consumo. Seus grãos fazem parte da dieta alimentar de populações urbanas e rurais, principalmente das regiões Norte e Nordeste, destacando por apresentar propriedades nutricionais superiores à do feijão-comum (Vale; Bertini; Borém, 2017).

O feijão-caupi é uma cultura de ciclo curto, baixa exigência hídrica e de fertilidade do solo. As exigências hídricas variam de 300 a 450 mm/ciclo. O manejo correto da irrigação permite que essa cultura expresse todo seu potencial genético de produtividade (Vale; Bertini; Borém, 2017).

O feijão-caupi é considerado moderadamente tolerante à salinidade, podendo suportar, sem perdas expressivas na produção, em torno de $4,9 \text{ dS m}^{-1}$ (Fageria; Soares Filho; Gheyi, 2010). Contudo, Dantas et al. (2002) observaram que o grau de tolerância dessa cultura ao estresse salino varia entre genótipos. O guia de reuso agrícola de ES recomenda, para o cultivo do feijão-caupi, atingir seu máximo potencial produtivo, uma condutividade elétrica da água de no máximo de $3,3 \text{ dS m}^{-1}$ e a condutividade elétrica do solo não pode ser superior a $4,9 \text{ dS m}^{-1}$ (IDEQ, 2007).

Apesar da expansão da área plantada e dos ganhos em produtividade, o rendimento médio nacional do feijão-caupi é de 499 kg ha^{-1} (CONAB, 2020), ainda

está muito abaixo do seu potencial produtivo. A baixa disponibilidade hídrica e a má distribuição das chuvas de regiões áridas e semiáridas e a baixa fertilidade contribuem para os baixos rendimentos (Vale; Bertini; Borém, 2017). Após a escolha do solo, do sistema de irrigação e da cultura a ser trabalhada é possível calcular a dose de aplicação do ES para satisfazer a demanda nutricional parcial ou total do feijão-caupi, e conseqüentemente parte da demanda hídrica também será atendida.

Diante do exposto, torna-se imprescindível o estudo de técnicas alternativas e mais sustentáveis de produção agrícola, como a aplicação de hidrogel e de ES que suprem a necessidade hídrica e nutricional do feijão-caupi. Além disso, a aplicação de ES por meio de irrigação por GSS contribuirá para mitigação dos problemas atuais de disponibilidade de água versus produção de alimento.

2 REFERÊNCIAS

- Ahuja, S. (2014). Preface. In *Water Reclamation and Sustainability* (pp. xix–xx). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411645-0.05001-X>
- Almuktar, S. A. A. N. & Scholz, M. (2016). Mineral and biological contamination of soil and *Capsicum annuum* irrigated with recycled domestic wastewater. *Agricultural Water Management*, 167, 95–109. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.01.008>
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*. 2021. Disponível em: <<https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/usos-da-agua>> Acesso em: 06/02/2024.
- Angelakis, A. & Snyder, S. (2015). Wastewater Treatment and Reuse: Past, Present, and Future. *Water*, 7(9), 4887–4895. <https://doi.org/10.3390/w7094887>
- Berendse, F., van Ruijven, J., Jongejans, E. & Keesstra, S. (2015). Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance. *Ecosystems*, 18(5), 881–888.
- Biswas, S. K., Mojid, M. A. & Wyseure, G. C. L. (2017). Physicochemical Properties of Soil under Wheat Cultivation by Irrigation with Municipal Wastewater in Bangladesh. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1253713>
- Carvalho, M., Matos, M., Castro, I., Monteiro, E., Rosa, E., Lino-Neto, T. & Carnide, V. (2019). Screening of worldwide cowpea collection to drought tolerant at a germination stage. *Scientia Horticulturae*, 247, 107–115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.082>
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento da safra brasileira: grãos*. Companhia Nacional de Abastecimento – Conab, Brasília – DF. V.7 – SAFRA 2019/20 – N.12 – Décimo segundo levantamento. Setembro 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>> Acesso em: 14/07/2021.
- Dantas, J. P., Marinho, F. J. L., Ferreira, M. M. M., do SN Amorim, M., Sílvia, I. de O. & de Sales, A. L. (2002). Avaliação de genótipos de caupi sob salinidade. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6(3), 425–430.
- Decock, C., Lee, J., Necpalova, M., Pereira, E. I. P., Tendall, D. M. & Six, J. (2015). Mitigating N₂O emissions from soil: from patching leaks to transformative action. *Soil*, 1(2), 687.
- Elgallal, M., Fletcher, L. & Evans, B. (2016). Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. *Agricultural Water Management*, 177, 419–431. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.08.027>
- Fageria, N. K., Soares Filho, W. dos S. & Gheyj, H. R. (2010). Melhoramento genético vegetal e seleção de cultivares tolerantes à salinidade. *Manejo Da Salinidade Na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados*. Fortaleza, INCT Sal, 206–218.

- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). FAO'S WORK ON CLIMATE CHANGE. <http://www.fao.org/3/a-i8037e.pdf>
- FAO, 2020a. Water scarcity. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/water/water-scarcity/en/>> Acesso em: 13/07/2021.
- Fatael, M., Kelvin, M. & Karoli, N. (2018). RESEARCH ARTICLE ASSESSMENT OF GROWTH AND DEVELOPMENT OF COMMON BEANS IRRIGATED WITH TREATED WASTEWATER.
- Fathi, H. & Mirzanejad, M. (2014). Effects of wastewater irrigation on the growth of two bean spices and soil chemical properties under greenhouse conditions. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 2(3), 88–93.
- Ghafoor, A., Murtaza, G., Maann, A. A., Qadir, M. & Ahmad, B. (2011). TREATMENTS AND ECONOMIC ASPECTS OF GROWING RICE AND WHEAT CROPS DURING RECLAMATION OF TILE DRAINED SALINE-SODIC SOILS USING BRACKISH WATERS. *Irrigation and Drainage*, 60(3), 418–426.
- Gonçalves, I. Z., Barbosa, E. A. A., Santos, L. N. S., Nazário, A. A., Feitosa, D. R. C., Tuta, N. F. & Matsura, E. E. (2017). Water relations and productivity of sugarcane irrigated with domestic wastewater by subsurface drip. *Agricultural Water Management*, 185, 105–115. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2017.01.014>
- Hanjra, M. A., Blackwell, J., Carr, G., Zhang, F. & Jackson, T. M. (2012). Wastewater irrigation and environmental health: Implications for water governance and public policy. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 215(3), 255–269. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEH.2011.10.003>
- Idaho Department of Environmental Quality. (2007). Guidance for Reclamation and Reuse of Municipal and Industrial Wastewater. Idaho Department of Environmental Quality. https://www.deq.idaho.gov/media/516329-guidance_reuse_0907.pdf
- Jasim, S. Y., Saththasivam, J., Loganathan, K., Ogunbiyi, O. O. & Sarp, S. (2016a). Reuse of Treated Sewage Effluent (TSE) in Qatar. *Journal of Water Process Engineering*, 11, 174–182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.05.003>
- Jasim, S. Y., Saththasivam, J., Loganathan, K., Ogunbiyi, O. O. & Sarp, S. (2016b). Reuse of Treated Sewage Effluent (TSE) in Qatar. *Journal of Water Process Engineering*, 11, 174–182. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2016.05.003>
- Keesstra, S. D., Geissen, V., Mosse, K., Piirainen, S., Scudiero, E., Leistra, M. & van Schaik, L. (2012). Soil as a filter for groundwater quality. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 507–516.
- Lal, R. (2009). Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Security*, 1(1), 45–57.
- Lamm, F. R. (2014). Irrigation and Nitrogen Management for Subsurface Drip Irrigated Corn – 25 years of K-State's Efforts. In 2014 Montreal, Quebec Canada July 13 –

July 16, 2014 (p. 1). ASABE.
<https://doi.org/https://doi.org/10.13031/aim.20141914980>

- Leuther, F., Schlüter, S., Wallach, R. & Vogel, H.-J. (2019). Structure and hydraulic properties in soils under long-term irrigation with treated wastewater. *Geoderma*, 333, 90–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.015>
- Malafaia, G., de Araújo, F. G., da Costa Estrela, D., Guimarães, A. T. B., Leandro, W. M. & de Lima Rodrigues, A. S. (2016). Corn production in soil containing in natura tannery sludge and irrigated with domestic wastewater. *Agricultural Water Management*, 163, 212–218. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2015.09.018>
- Mathan, K. K. (1994). Studies on the influence of long-term municipal sewage-effluent irrigation on soil physical properties. *Bioresource Technology*, 48(3), 275–276. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90159-7](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)90159-7)
- Matos, A. T. de & Matos, M. P. de. (2017). Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. In Editora UFV. Editora UFV.
- Muyen, Z., Moore, G. A. & Wrigley, R. J. (2011). Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agricultural Water Management*, 99(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.07.021>
- Nogueira, S. F., Pereira, B. F. F., Gomes, T. M., de Paula, A. M., dos Santos, J. A. & Montes, C. R. (2013). Treated sewage effluent: Agronomical and economical aspects on bermudagrass production. *Agricultural Water Management*, 116, 151–159. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2012.07.005>
- Odlare, M. (2014). Introductory Chapter for Water Resources. In Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09035-7>
- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J. J., Koukoulakis, P. & Asano, T. (2010). Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1233–1241. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2010.03.003>
- Pereira, J. S., Olszewski, N. & da Silva, J. C. (2018). RETENÇÃO DE ÁGUA E DESENVOLVIMENTO DO FEIJÃO CAUPI EM FUNÇÃO DO USO DE POLÍMERO HIDRORRETENTOR NO SOLO. *Revista Engenharia Na Agricultura*, 26(6), 582.
- Saffari, V. R. & Saffari, M. (2013). Effect of treated municipal wastewater on bean growth, soil chemical properties, and chemical fractions of zinc and copper. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(11), 4475–4485.
- Santos, H. T. dos, Carvalho, D. F. de, Souza, C. F. & Medici, L. O. (2015). Cultivo de alface em solos com hidrogel utilizando irrigação automatizada. *Engenharia Agrícola*, 35(5), 852–862.

- Santos, S. R., Ribeiro, D. P., Matos, A. T., Kondo, M. K. & Araújo, E. D. (2017). Changes in soil chemical properties promoted by fertigation with treated sanitary wastewater. *Engenharia Agrícola*, 37(2), 343–352.
- Satriani, A., Catalano, M. & Scalcione, E. (2018). The role of superabsorbent hydrogel in bean crop cultivation under deficit irrigation conditions: A case-study in Southern Italy. *Agricultural Water Management*, 195, 114–119. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.008>
- Singh, P. K., Deshbhratar, P. B. & Ramteke, D. S. (2012). Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. *Agricultural Water Management*, 103, 100–104. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.10.022>
- Smith, P., Cotrufo, M. F., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P. J., Elliott, J. A., McDowell, R., Griffiths, R. I., Asakawa, S. & Bustamante, M. (2015). Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *Soil*, 1(2), 665.
- Tzanakakis, V. E., Paranychianaki, N. V & Angelakis, A. N. (2007). Soil as a wastewater treatment system: historical development. *Water Science and Technology: Water Supply*, 7(1), 67–75.
- Tzanakakis, V., Koo-Oshima, S., Haddad, M., Apostolidis, N. & Angelakis, A. (2014). The history of land application and hydroponic systems for wastewater treatment and reuse. *Evolution of Sanitation and Wastewater Technologies through the Centuries*; IWA Publishing: London, UK, 457.
- Urbano, V. R., Mendonça, T. G., Bastos, R. G. & Souza, C. F. (2017). Effects of treated wastewater irrigation on soil properties and lettuce yield. *Agricultural Water Management*, 181, 108–115. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.12.001>
- Vale, J. C. do, Bertini, C. & Borém, A. (2017). *Feijão-Caupi do Plantio à Colheita*. EDITORA UFV.
- van Beek, C. L. & Tóth, G. (2012). Risk assessment methodologies of soil threats in Europe. *JRC Scientific and Policy Reports EUR*, 24097.
- Voulvoulis, N. (2018). Water Reuse from a Circular Economy Perspective and Potential Risks from an Unregulated Approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>
- Wang, J., Niu, W., Li, Y. & Lv, W. (2018). Subsurface drip irrigation enhances soil nitrogen and phosphorus metabolism in tomato root zones and promotes tomato growth. *Applied Soil Ecology*, 124, 240–251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.11.014>
- Wu, D., Xu, X., Chen, Y., Shao, H., Sokolowski, E. & Mi, G. (2019). Effect of different drip fertigation methods on maize yield, nutrient and water productivity in two-soils in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 213, 200–211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.018>

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. In Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). <https://doi.org/10.12691/env-3-1-3>

Xu, J., Wu, L., Chang, A. C. & Zhang, Y. (2010). Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1–3), 780–786. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.07.094>

CAPÍTULO 1: HIDROGEL E ESGOTO SANITÁRIO NA EMERGÊNCIA DO FEIJÃO-CAUPI: REDUÇÃO OU ELEVAÇÃO DA RESTRIÇÃO HÍDRICA?

RESUMO: Estratégias que diminuam a demanda por água doce devem ser buscadas, principalmente em regiões com baixa disponibilidade hídrica. O uso de hidrogel e de esgoto sanitário são alternativas potenciais na agricultura, pois suprem parte da necessidade hídrica e nutricional dos cultivos. Diante disso, foram avaliados os efeitos do hidrogel e esgoto sanitário sintético (ESS) nos atributos físicos e químicos do substrato e nas características de emergência do feijão-caupi. As doses de hidrogel foram de 0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12 e 0,14% em relação ao substrato seco. As fontes de hidratação foram ESS e água destilada (AD). O feijão-caupi foi semeado em bandejas de isopor e mantido em câmara de crescimento com temperatura de $25 \pm 0,5$ °C e fotoperíodo de 12/12 h. O uso de hidrogel e a hidratação com ESS proporcionaram aumento nos parâmetros de retenção de água pelo substrato, sólidos dissolvidos totais, pH e na condutividade elétrica (CE_{es}). Apesar do aumento de água disponível no substrato, o aumento da CE_{es} impactou negativamente nas características de emergência do feijão-caupi, reduzindo a germinação e índice de velocidade de emergência (IVE); e aumentando o tempo requerido para a emergência de 50% das sementes. Dessa forma conclui-se que o hidrogel aplicado próximo das sementes afeta negativamente a emergência do feijão-caupi e, assim, novas estratégias devem ser investigadas para seu uso. Já o ESS, mesmo aumentando a CE_{es} , proporcionou benefícios para a germinação, mostrando ser uma alternativa viável de fonte hídrica para ser usada na emergência do feijão-caupi.

Palavras-chave: Água disponível, água residuária, germinação, hidrogel, semeadura.

CHAPTER 1: HYDROGEL AND MUNICIPAL WASTEWATER IN THE EMERGENCY OF COWPEA: REDUCING OR RISING WATER RESTRICTION?

ABSTRACT: Strategies that reduce the demand for freshwater must be pursued, especially in regions with low water availability. The use of hydrogel and municipal wastewater are potential alternatives in agriculture, as they supply part of the water and nutritional needs of crops. Therefore, the effects of hydrogel and synthetic municipal wastewater (MWW) on the physical and chemical attributes of the substrate and the emergence characteristics of cowpea were evaluated. Hydrogel doses were 0; 0.02; 0.04; 0.06; 0.08; 0.10; 0.12 and 0.14% in relation to the dry substrate. The sources of hydration were synthetic MWW and distilled water (DW). Cowpea was sown in Styrofoam trays and kept in a growth chamber at a temperature of 25 ± 0.5 °C and a photoperiod of 12/12 h. The use of hydrogel and hydration with synthetic MWW provided an increase in the parameters of water retention by the substrate, total dissolved solids, pH, and electrical conductivity (EC_{es}). Despite the increase in available water in the substrate, the increase in EC_{es} negatively impacted the emergence characteristics of cowpea, reducing germination and emergence speed index (ESI); and increasing the time required for the emergence of 50% of the seeds. Thus, it is concluded that the hydrogel applied close to the seeds negatively affects the emergence of cowpea and, thus, new strategies should be investigated for its use. The synthetic MWW, on the other hand, even increasing the CE_{es} , provided benefits for germination, proving to be a viable water source alternative to be used in the emergence of cowpea.

Keywords: Available water, wastewater, germination, hydrogel, sowing.

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que em 2025 mais de 60% da população mundial passará por uma restrição ao acesso a água (FAO, 2020), seja por quantidade ou por qualidade. Esse problema afeta diretamente o setor agrícola, onde há a necessidade de produzir mais alimento para a população crescente e ao mesmo tempo não criar um conflito pelo uso da água. Assim, a agricultura irrigada é sujeita a desafios por ser uma atividade que apresenta maior demanda por recursos hídricos, sendo responsável por 50% do uso de água doce (ANA, 2021).

É interessante buscar estratégias que diminuam a demanda por água doce, principalmente em regiões que apresentam problemas de disponibilidade hídrica. Em virtude disso, o uso de hidrogel é uma alternativa promissora para aumentar a capacidade de retenção de água no solo e, conseqüentemente, a água disponível para as plantas (Pereira et al., 2018). O hidrogel agrícola pode absorver até 300% do seu peso em água e depois disponibilizá-la a planta de forma controlada por um maior período de tempo (Satriani et al., 2018).

Na fase inicial dos cultivos, logo após o transplante ou semeadura, apenas a camada inicial do solo é explorada o que resulta em pequena água disponível. Dessa forma, irrigações frequentes e com menores lâminas de irrigação são necessárias. Entretanto, sistemas mecanizados de irrigação, que apresentam lâminas mínimas de projeto superiores a demanda hídrica da cultura, e os sistemas por gotejamento subsuperficial, que precisam de maiores lâminas para atingir o bulbo de projeto, irão desperdiçar grandes volumes de água por evento de irrigação. Assim, o uso do hidrogel, por aumentar a retenção de água no solo, promoverá o aumento do turno de rega e redução do desperdício de água nos cultivos irrigados pelos sistemas supracitados.

Além da redução da demanda hídrica, faz-se necessário também a busca por estratégias que minimizem a poluição dos corpos hídricos. O uso de esgoto sanitário na agricultura é uma alternativa promissora de disposição final e possibilita reduzir o consumo de água doce, diminuir a poluição de corpos d'água, preservar os recursos hídricos, disponibilizar água e nutrientes para as plantas e reciclar nutrientes para o solo (Elgallal et al., 2016).

Associando a aplicação de hidrogel com esgoto sanitário é possível produzir mais e de forma sustentável, ou seja, potencializar a eficiência do uso da água. No entanto, a aplicação de novas técnicas na agricultura deve ser criteriosa. A aplicação de hidrogel e esgoto sanitário proporciona efeitos positivos nos atributos físicos e químicos do solo e no desenvolvimento das culturas (Jasim et al., 2016; Santos et al., 2015). Entretanto, essas técnicas em conjunto podem provocar a salinização do solo (Carvalho et al., 2019; Leuther et al., 2019) e, conseqüentemente, uma restrição hídrica nas fases iniciais de germinação e emergência de plântulas. É oportuno ressaltar que são nessas fases que o estande de plantas é garantido, impactando na produtividade e rentabilidade das lavouras comerciais.

Dentre as lavouras comerciais, o feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) se destaca dentre aquelas mais cultivadas nas regiões áridas e semiáridas. Essa leguminosa, de origem africana, constitui uma das principais fontes de proteína vegetal, desempenhando um importante papel na alimentação humana e na geração de emprego e renda. É uma cultura de ciclo curto e possui baixas exigências hídricas e de fertilidade do solo (Farooq et al., 2020).

Diante do exposto, torna-se imprescindível o estudo de técnicas alternativas e mais sustentáveis de produção agrícola, como a aplicação de hidrogel e de esgoto sanitário que supram parte da necessidade hídrica e nutricional do feijão-caupi. Objetivou-se com o presente trabalho avaliar se o hidrogel e o esgoto sanitário sintético interferem nos atributos físicos e químicos do substrato e nas características de emergência do feijão-caupi, cultivar BRS Tumucumaque.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em uma câmara de crescimento do Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (BIOAGRO) na Universidade Federal de Viçosa (UFV), no período de janeiro a março de 2019. Para a condução do experimento foram utilizadas sementes comerciais não certificadas de primeira geração (S1) de feijão-caupi da cultivar BRS Tumucumaque.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em arranjo fatorial (8 x 2), constituído pela combinação de oito doses de hidrogel e duas fontes de hidratação, com quatro repetições, totalizando 64 unidades experimentais. As doses foram de 0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12 e 0,14% de hidrogel no substrato seco. As fontes de hidratação foram o esgoto sanitário sintético (ESS) e a água destilada (AD). Cada unidade experimental foi composta por uma bandeja de isopor com 1 semente por célula.

O hidrogel utilizado foi o produto comercial Agrogel[®]. Esse produto é de alta qualidade e pureza, especialmente desenvolvida para a agricultura, e compreende a linha de polímeros Hidroplan-EB (HyB) (Hydroplan, 2020).

No presente estudo, para simular o esgoto sanitário, utilizou-se a solução de origem sintética (Nopens et al., 2001). Os sais e ingredientes foram diluídos em água de abastecimento. Os compostos utilizados para o preparo do esgoto sanitário sintético estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição teórica e respectivas concentrações para a produção de 1 litro de esgoto sanitário sintético. Fonte: Adaptado de Nopens et al. (2001)

Sais	Quant. ¹	DQO	mg L ⁻¹		
			N	P	K
Ureia	92	23	43	0	0
MAP	13	0	1	3	0
Acetato de sódio*	132	79	0	0	0
Peptona	17	17	1	0	0
MgSO ₄	20	0	0	0	0
KH ₂ PO ₄	23	0	0	5	7
KCl	25	0	0	0	13
FeSO ₄ 7H ₂ O	5,8	0	0	0	0

Ingredientes					
Amido	122	122	0	0	0
Leite em pó	116	116	7	1	0
Fermento	52	52	6	0	0
Óleo de soja	29	29	0	0	0
Total	646	439	58	10	15

¹Massa de sais e ingredientes para produção de 1 L de esgoto sanitário sintético *Acetato de sódio hidratado.

2.2. Avaliação da curva de retenção de água no substrato

Realizou-se uma amostragem da mistura de areia+ hidrogel para determinação da água retida em diferentes potenciais mátricos (-10; -30; -100; -300; -500 e -1.500 kPa). Essas análises foram realizadas no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. A quantidade de água retida em diferentes tensões foi determinada em câmara de pressão de Richards (Richards, 1949). A quantidade de água disponível no substrato (areia) para a planta foi calculada pela diferença entre as águas retidas na capacidade de campo (-10 kPa) e no ponto de murcha permanente (-1.500 kPa) (Bernardo et al., 2019).

A curva de retenção de água no substrato foi determinada usando a equação de Van Genuchten com o software SWRC 3.0 (Dourado Neto et al., 2000) para todas as doses de hidrogel e fontes hídricas.

2.3. Avaliação dos atributos químicos do substrato

Da mesma amostra enviada para o Laboratório de Água e Solo para as determinações das curvas de retenção de água no substrato, determinaram-se o potencial hidrogeniônico (pH), a condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es}) e sólidos dissolvidos totais (SDT) do substrato na proporção 1:2,5 substrato: água. As soluções foram agitadas e permaneceram em descanso por 1 h, logo após efetuaram-se as medições utilizando o equipamento MP Series da Hach.

2.4. Emergência e desenvolvimento inicial de plântulas

O experimento foi conduzido em sala de crescimento climatizada a uma temperatura de $25 \pm 0,5$ °C e fotoperíodo/nictoperíodo de 12/12 horas. Utilizou-se como substrato areia lavada e esterilizada em estufa à 200 °C por duas horas. O

umedecimento do substrato foi efetuado com quantidade de água correspondente a 60% da capacidade de retenção (BRASIL, 2009).

Em cada bandeja foram adicionados 4,5 kg de areia seca e, com base na proporção de hidrogel por substrato, foram determinadas as doses a serem aplicadas. O hidrogel foi homogeneizado ao substrato e, posteriormente, AD e ESS foram calculadas e aplicadas para preenchimento de 200 células com a mistura. Dessa forma, cada célula foi preenchida com 22,5 g de areia seca, e no tratamento de 0,14%, por exemplo, foram aplicados 31,5 µg de hidrogel.

A semeadura de feijão-caupi foi realizada na profundidade de três centímetros, em bandejas de isopor (55 cm de comprimento, 36 cm de largura e 4,7 cm de altura). A irrigação foi feita com borrifadores, repondo a água evaporada duas vezes ao dia. A contagem das plântulas emergidas foi realizada diariamente, contabilizando-se as plântulas que apresentavam os cotilédones totalmente expandidos acima do substrato, durante o período de 8 dias.

Foram avaliados o percentual de emergência (E) (Equação 1), o índice de velocidade de emergência (IVE) (Equação 2) (Maguire, 1962), o tempo necessário para que ocorresse 50% de plântulas emergidas (T50) (Farooq et al., 2005) e altura de plântulas do feijão-caupi.

$$E = \frac{n}{N} \times 100 \quad (1)$$

$$IVE = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{t_i} \quad (2)$$

Em que, E é a porcentagem de emergência (%); n o número de sementes emergidas; N o número total de sementes, n_i é o número de sementes emergidas em cada dia; e t_i o número de dias depois do início do teste em cada contagem.

2.5. Teor relativo de água

Para a avaliação do teor relativo de água e o déficit de saturação hídrica, foram selecionadas 4 plântulas que representavam a média de cada repetição. Da folha primária dessas plântulas foram retirados discos de 1 cm de diâmetro e determinaram-se as massas frescas (MF). Após a pesagem, os discos foliares de cada unidade experimental foram submersos em água destilada (AD) por um período de 24 horas. Posteriormente, os discos foliares foram retirados da AD e enxugadas e pesados novamente para a obtenção da massa máxima ou túrgida (MM). Em seguida, estas

folhas foram colocadas para secar em estufa à temperatura em torno de 70 °C, até a obtenção da massa seca constante (MS).

Com estes dados calculou-se o teor relativo de água (TRA) e déficit de saturação hídrica (DSH) por meio das Equações 3 e 4, respectivamente.

$$TRA = \frac{MF-MS}{MM-MS} \times 100 \quad (3)$$

$$DSH = \frac{MM-MF}{MM-MS} \times 100 \quad (4)$$

Em que, MF é a massa fresca dos discos foliares, g; MM a massa máxima dos discos foliares, após imersão e água destilada, g; MS a massa seca dos discos foliares, g.

2.6. Análises estatísticas

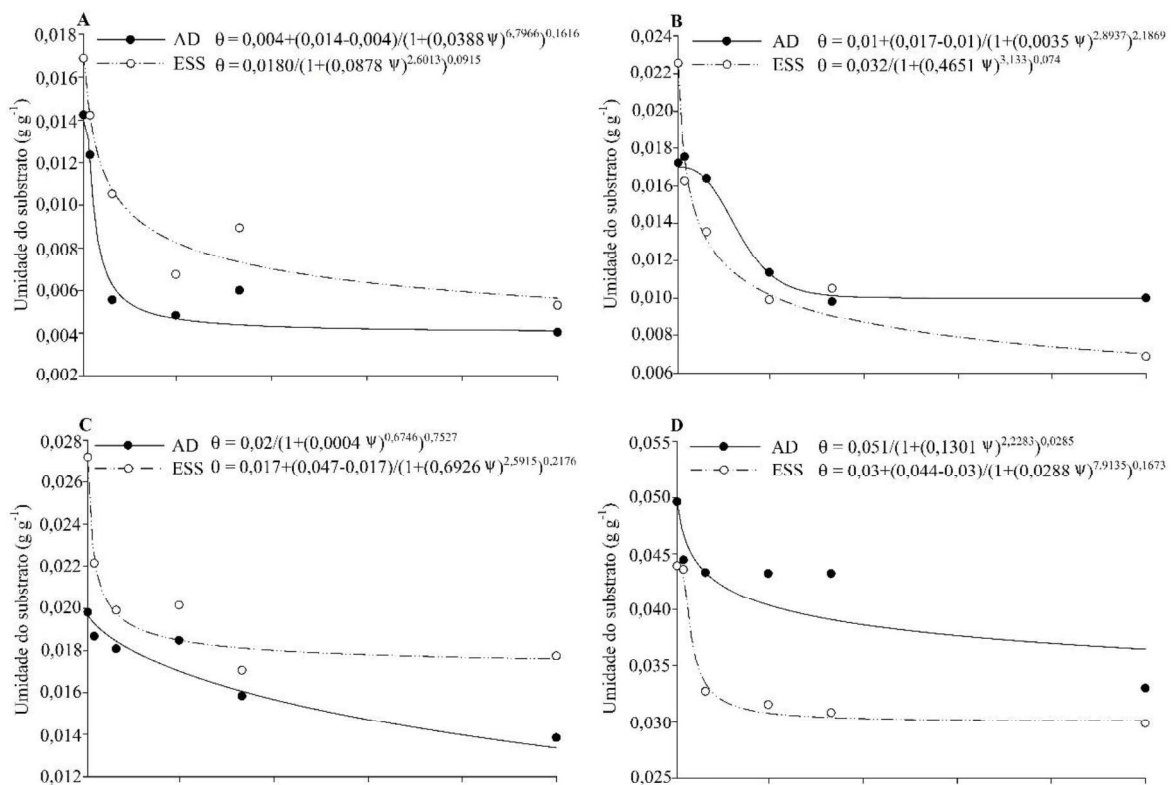
A normalidade dos dados foi testada por meio do teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância. Tendo sido atendido os pressupostos de normalidade, os dados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos a 5% pelo teste F, procedeu-se à análise de regressão para os dados quantitativos e teste de média para os dados qualitativos. A comparação de médias foi realizada usando-se o teste de Tukey a 5% de significância. Para os fatores quantitativos, foram testados modelos lineares e quadráticos. A seleção do modelo foi com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t a 5% de significância, no coeficiente de determinação (R^2) e no fenômeno biológico. Para execução das análises estatísticas foi utilizado o pacote *Experimental Designs* do software “R” (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2020).

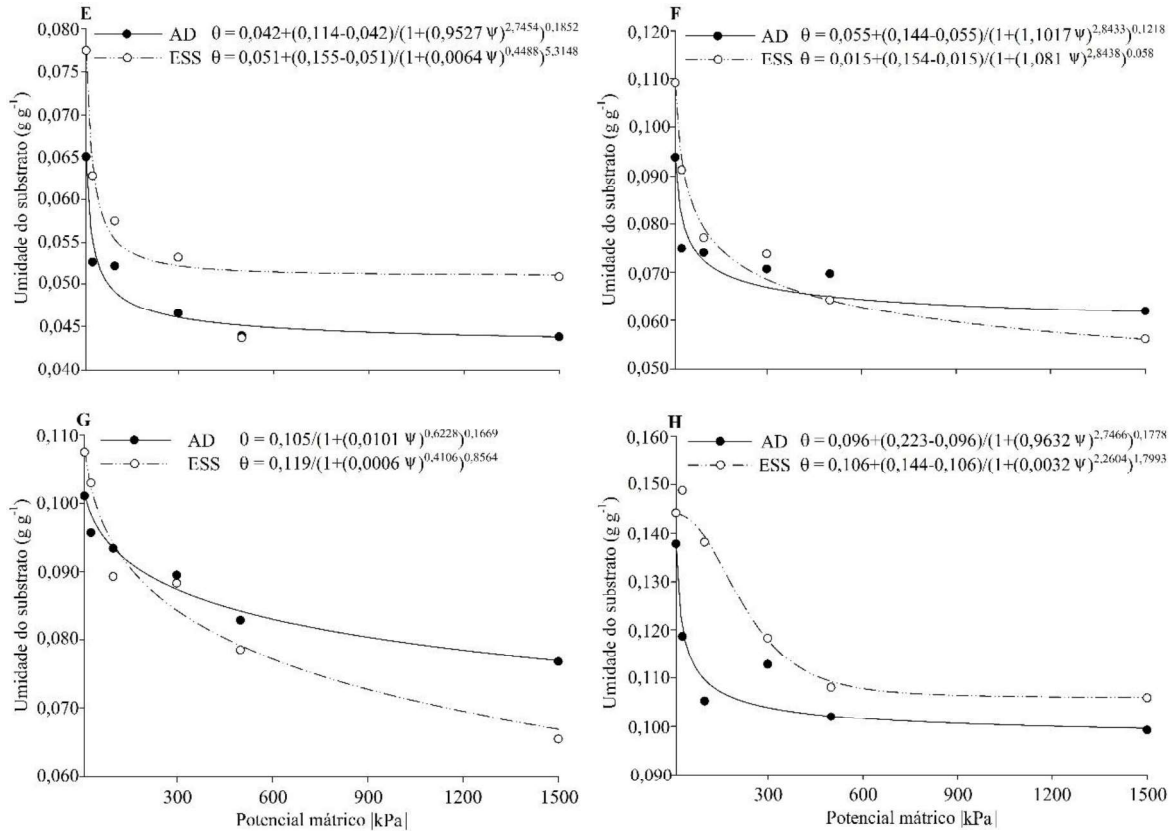
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Retenção de água no substrato

As curvas de retenção de água no substrato contendo diferentes doses do hidrogel e recebendo diferentes fontes hídricas, constituídas de água destilada (AD) e esgoto sanitário sintético (ESS), são apresentadas na Figura 1. Os ajustes dos modelos foram significativos ao nível de 5%. Observa-se que os comportamentos das curvas de retenção de água no substrato variaram para cada dose de hidrogel e nas diferentes fontes hídricas, entretanto, não se verificou nenhuma tendência em resposta aos fatores impostos. Diante disso, avaliou-se os efeitos dos tratamentos por meio da análise de variância para a capacidade de campo (CC) equivalente ao potencial mátrico de -10 kPa, o ponto de murcha permanente (PMP) em -1.500 kPa e a água disponível no substrato (ADS) (Tabela 2).

Figura 1 - Curva de retenção de água nos substratos contendo doses de 0 (A); 0,02 (B); 0,04 (C); 0,06 (D); 0,08 (E); 0,10 (F); 0,12 (G) e 0,14% (H) de hidrogel para as diferentes fontes hídricas de água destilada (AD) e esgoto sanitário sintético (ESS)





As interações entre hidrogel e as fontes hídricas (FH) foram significativas para todos os atributos físico-hídricos estudados (Tabela 2). Observa-se também na Tabela 2, com exceção ao tratamento que o substrato recebeu dose de hidrogel de 0,06%, que o ESS proporcionou maiores valores de CC. O ESS em sua composição contém nutrientes (sais) (Tabela 1) e, com isso, promove redução no potencial osmótico, resultando no aumento da retenção de água. A aplicação de esgoto sanitário tratado aumenta significativamente o conteúdo de água retido na camada superior do solo em comparação com a aplicação de água doce (Loy et al., 2018; Tunc; Sahin, 2015). Por outro lado, a água contida no substrato apresentará menor potencial total (potencial matricial + potencial osmótico). Dessa forma, apesar de aumento de água retida na CC, uma fração da mesma não estará disponível para a planta. Essa quantidade de água disponível será em função da capacidade da cultura em tolerar a salinidade (Dias; Blanco, 2010).

Tabela 2 - Resumo da análise de variância e médias de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível no substrato (ADS) contendo

diferentes doses de hidrogel (HGEL) e hidratado com fontes hídricas (FH) de água destilada (AD) ou esgoto sanitário sintético (ESS)

Doses de HGEL (%)	CC (g g ⁻¹)		PMP (g g ⁻¹)		ADS (g g ⁻¹)	
	AD	ESS	AD	ESS	AD	ESS
0,00	0,0141 b	0,0170 a	0,0041 a	0,0055 a	0,0100 b	0,0115 a
0,02	0,0171 b	0,0225 a	0,0100 a	0,0069 b	0,0071 b	0,0155 a
0,04	0,0197 b	0,0271 a	0,0136 b	0,0177 a	0,0061 b	0,0095 a
0,06	0,0496 a	0,0440 b	0,0348 a	0,0300 b	0,0148 a	0,0140 a
0,08	0,0649 b	0,0776 a	0,0438 b	0,0510 a	0,0211 b	0,0266 a
0,10	0,0938 b	0,1090 a	0,0619 a	0,0561 b	0,0319 b	0,0529 a
0,12	0,1012 b	0,1076 a	0,0769 a	0,0662 b	0,0243 b	0,0414 a
0,14	0,1379 b	0,1441 a	0,0994 b	0,1060 a	0,0384 a	0,0381 a
HGEL	8,71E-3**		4,67E-3**		7,41E-4**	
FH	3,20E-4**		8,59E-6*		3,90E-4**	
HGEL*FH	3,96E-5**		4,14E-5**		6,57E-5**	
CV (%)	0,21		1,59		2,98	

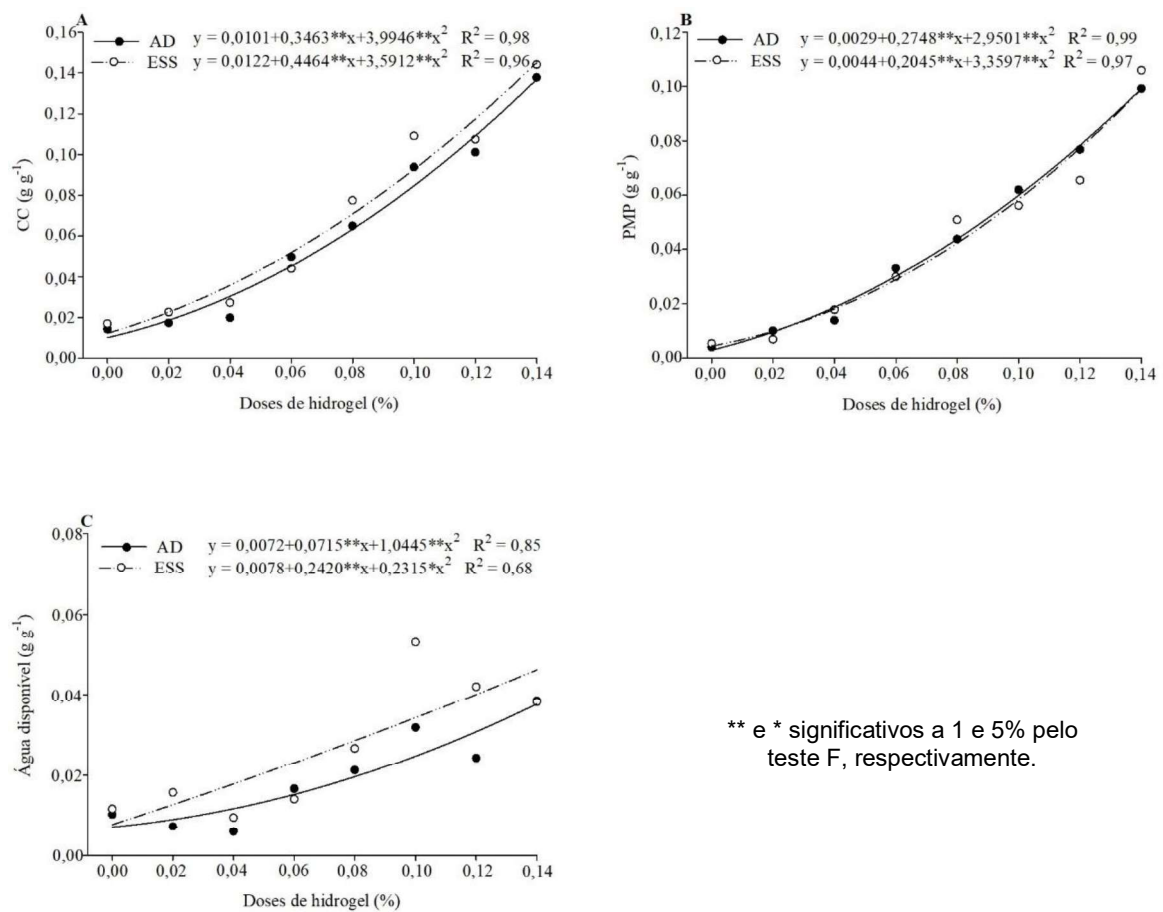
Dentro de cada variável analisada as médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem as fontes hídricas entre si para cada dose de hidrogel pelo teste Tukey a 0,05 de significância.

Os maiores valores de CC, nos tratamentos hidratados com ESS, também possibilitaram maiores valores de ADS (Tabela 2). Em média, o ESS proporcionou aumento de 43,1% da ADS em relação a outra fonte hídrica. No presente trabalho, a ADS foi a diferença entre os valores de CC (-10 kPa) e PMP (-1.500 kPa), que por sua vez, não apresentou uma predominância de maiores valores para uma mesma fonte hídrica de hidratação do substrato. Isso possivelmente ocorreu pelo fato de o potencial osmótico apresentar menor contribuição relativa em situações de menores potenciais matriciais (Dias; Blanco, 2010), como é o caso do PMP.

Na Figura 2 são apresentados os comportamentos de diferentes atributos físico-hídricos do substrato em função de diferentes doses de hidrogel e fontes hídricas. Independente da fonte hídrica utilizada na hidratação do substrato, os valores de CC, PMP e ADS aumentaram em resposta as doses crescentes de hidrogel. Este comportamento pode ser justificado devido à capacidade do hidrogel em absorver a água em mais de 100 vezes a sua massa, e liberando-a de forma controlada (Navroski et al., 2015). O mecanismo de absorção de água pelo hidrogel se dá pelo primeiro contato das moléculas de água na matriz do polímero, que hidratam os grupos hidrofílicos polares. Esse processo é chamado de ligação primária da água e resulta no início da expansão do polímero. Em seguida, a água livre entra na estrutura do gel por osmose preenchendo o espaço entre as cadeias poliméricas e os poros vazios do

hidrogel. Segundo Mendonça et al. (2015), os hidrogel atuam como condicionadores do solo, melhorando propriedades estruturais (aumento de retenção de água), mas que apresentam também outras vantagens como elevação da permeabilidade e taxas de infiltração, além de reduzirem a erosão hídrica e contribuírem para o uso eficiente da água.

Figura 2 - Capacidade de campo (CC) (A); ponto de murcha permanente (PMP) (B) e água disponível no substrato (ADS)(C) em diferentes doses de hidrogel e hidratado com água destilada (AD) ou esgoto sanitário sintético (ESS)



A princípio, desde que o solo apresente boa porosidade de aeração, o manejo agrícola que possibilite o aumento da CC é visto como vantajoso. No entanto, com a aplicação do hidrogel aumentou-se também o PMP (Figura 2B), demonstrando que o hidrogel retém fortemente parte da água, sendo necessária a degradação do hidrogel para a liberação da água fortemente retida. Parvathy et al. (2014) verificaram a

capacidade do hidrogel em liberar a água absorvida de forma lenta para o ambiente, liberando parcialmente a umidade retida em um período de 30 dias.

A aplicação do hidrogel no substrato favoreceu o aumento da água disponível do substrato (Figura 2C). Resultado semelhante foi observado por Pereira et al. (2018). A ADS representa a disponibilidade total de água no substrato, e para encontrar a disponibilidade real de água para as culturas é necessário multiplicar por um fator de disponibilidade (f), que varia de 0,3 a 0,4 para as leguminosas (Bernardo et al., 2019). De acordo com as equações de regressão, as doses de hidrogel de 0,0555% e 0,0313% são suficientes para duplicar o valor de água disponível do substrato hidratado com água destilada e esgoto sanitário sintético, respectivamente. Em termos práticos, isso significa que o turno de rega também poderá ser dobrado, resultando em maior flexibilidade no manejo da irrigação e aumentando a segurança hídrica. Em relação a maior dose de hidrogel aplicada (0,14%), ela foi responsável por aumentar em 6,3 e 6,7 vezes a ADS hidratado com AD e ESS, respectivamente.

A utilização do hidrogel como condicionador do solo possibilitou melhoria na retenção de água no solo e em grande parte das propriedades morfológicas e produtivas do feijão-caupi (Pereira et al., 2018). Mazen et al. (2015) observaram melhoria no desenvolvimento do milho com a aplicação de diferentes hidrogéis misturados ao solo nas proporções de 0; 0,05; 0,10; 0,20 e 0,40%. Os autores concluíram que os diferentes tipos de hidrogéis podem melhorar a disponibilidade de água no solo.

3.2. Condutividade elétrica, SDT e pH do substrato

As interações entre hidrogel e as fontes hídricas (FH) foram significativas para todos os atributos químicos avaliados (Tabela 3). Independente da dose de hidrogel, observa-se que o esgoto sanitário sintético (ESS) promoveu um aumento da condutividade elétrica (CE_{es}) e dos sólidos dissolvidos totais (SDT) do substrato. Isso é justificado pela presença de sais e outros elementos utilizados no preparo do ESS (Tabela 1). O maior valor de CE_{es} do substrato hidratado com ESS foi de 100,90 $\mu S\ cm^{-1}$, equivalente à 0,10 $dS\ m^{-1}$. Esse valor é inferior aos valores de referência para a cultura do feijão-caupi, que de acordo com Ayers e Westcot (1999) possui o valor limite de 2,5 $dS\ m^{-1}$.

Tabela 3 - Resumo da análise de variância e médias de condutividade elétrica do substrato (CE_{es}), sólidos dissolvidos totais (SDT) e potencial hidrogeniônico (pH) do substrato após a emergência do feijão-caupi com diferentes doses de hidrogel (HGEL) e hidratado com fontes hídricas (FH) constituídas de água destilada (AD) ou esgoto sanitário sintético (ESS)

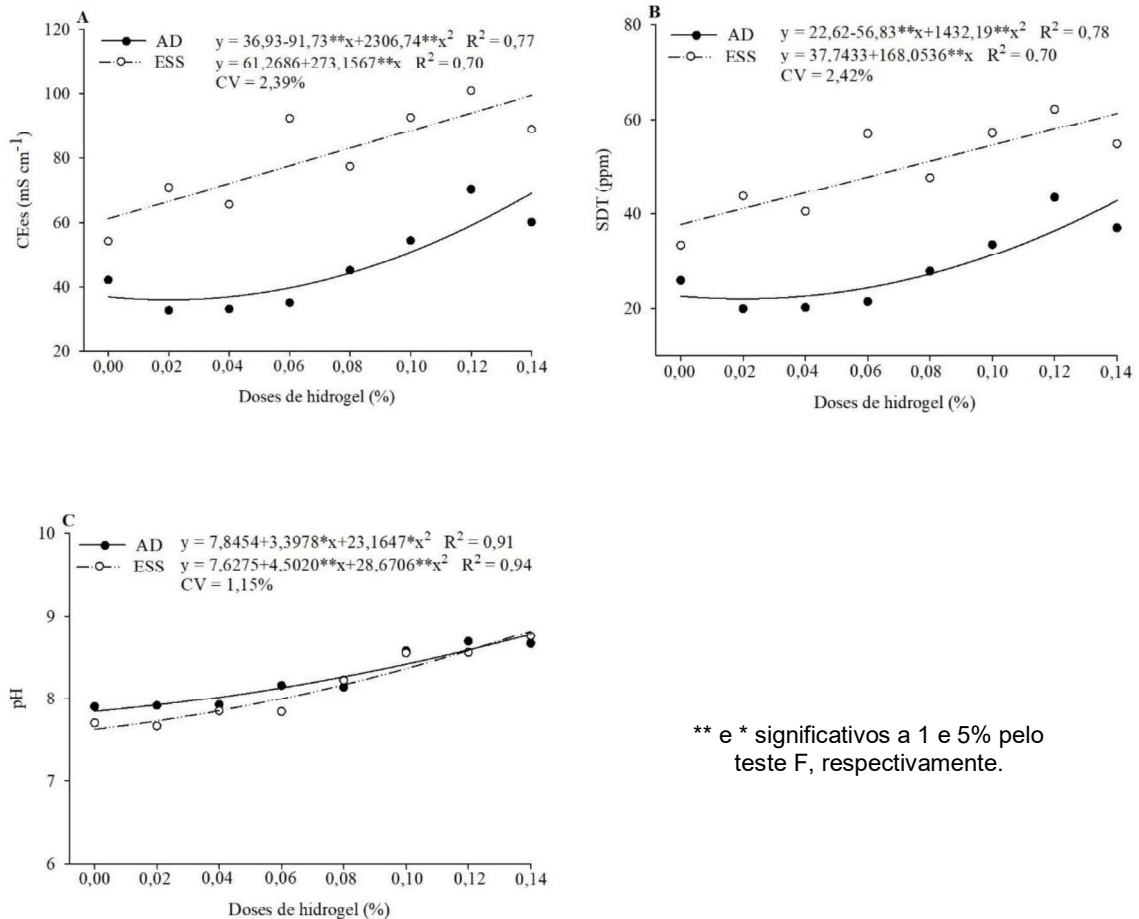
Doses de HGEL (%)	CE_{es} ($\mu S\ cm^{-1}$)		SDT (ppm)		pH	
	AD	ESS	AD	ESS	AD	ESS
0,00	42,13 b	54,22 a	25,88 b	33,39 a	7,90 a	7,70 b
0,02	32,73 b	70,93 a	19,99 b	43,71 a	7,91 a	7,67 b
0,04	33,13 b	65,70 a	20,25 b	40,47 a	7,92 a	7,85 a
0,06	35,11 b	92,38 a	21,48 b	56,88 a	8,16 a	7,84 b
0,08	45,16 b	77,39 a	27,78 b	47,67 a	8,14 a	8,22 a
0,10	54,43 b	92,62 a	33,52 b	57,03 a	8,57 a	8,55 a
0,12	70,42 b	100,90 a	43,40 b	62,13 a	8,69 a	8,56 a
0,14	60,14 b	88,98 a	37,05 b	54,79 a	8,66 a	8,76 a
HGEL	1,10E+3**		4,22E+2**		8,87E-1**	
FH	1,37E+4**		5,21E+3**		1,30E-1**	
HGEL*FH	2,36E+2**		9,01E+1**		3,04E-2*	
CV (%)	2,39		2,42		1,15	

Dentro de cada variável analisada as médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem as fontes hídricas entre si para cada dose de hidrogel pelo teste Tukey ao nível de significância de 0,05.

Em relação ao potencial hidrogeniônico (pH), verifica-se (Tabela 3) que o ESS proporcionou menores valores nos tratamentos em que os substratos receberam menores doses de hidrogel, comparado aos com uso de água destilada (AD).

Na Figura 3 são apresentados os efeitos das diferentes doses de hidrogel nos atributos químicos do substrato. Independente da fonte hídrica utilizada para hidratação do substrato, o aumento das doses de hidrogel promoveu acréscimos nos valores de CE_{es} , SDT e pH.

Figura 3 - Condutividade elétrica do substrato (CE_{es}) (A); sólidos dissolvidos totais (SDT) (B) e potencial hidrogeniônico (pH) (C) do substrato em função de diferentes doses de hidrogel e fontes de hidratação com água destilada (AD) e esgoto sanitário sintético (ESS)



De acordo com as equações de regressão da Figura 3A, o tratamento que recebeu AD e dose de 0% de hidrogel apresentou CE_{es} de $36,93 \mu S cm^{-1}$, enquanto para a dose de 0,14% de hidrogel foi de $69,30 \mu S cm^{-1}$, ou seja, um aumento de 87,65% da CE_{es} . Para o tratamento com ESS, as doses de 0 e 0,14% de hidrogel proporcionaram CE_{es} de 61,27 e $99,51 \mu S cm^{-1}$, respectivamente, ou seja, um aumento de 62,41% da CE_{es} . A elevação na CE_{es} em função das doses de hidrogel pode ser atribuída a liberação de K oriunda da própria composição química do hidrogel, pois ele é composto de acrilato de potássio. Em outras situações, o aumento da CE_{es} também pode ser devido à retenção de água, e conseqüentemente de nutrientes, devido a menor lixiviação, o que causa a elevação do teor de sais no

substrato. O incremento da CE_{es} em função das doses de hidrogel também foi relatado em diferentes pesquisas (Mendonça et al., 2013; Navroski et al., 2015; Carvalho et al., 2019).

Já a elevação do pH com a adição do hidrogel é devido à natureza alcalina que ele apresenta. O aumento do pH em função das doses de hidrogel também foi relatado por Navroski et al. (2015). O aumento do pH pode ser prejudicial a germinação, entretanto, a influência do pH nessa fase tem recebido pouca atenção. Segundo Wagner Júnior et al. (2007), valores de pH superiores à 8,0 têm sido relatados como inibidores do processo germinativo. Além disso, o aumento do pH reduz a disponibilidade de nutrientes, como o fósforo, podendo prejudicar a fase inicial de um ciclo de cultivo, uma vez que esse elemento é importante para as divisões celulares.

3.3. Emergência e desenvolvimento inicial de plântulas

Na Tabela 4 está apresentado um resumo da análise de variância para o percentual de emergência, índice de velocidade de emergência (IVE) e tempo requerido para a emergência de 50% das sementes (T50) do feijão-caupi. As fontes hídricas proporcionaram efeito isolado na variável emergência. Verifica-se também na Tabela 4 que o esgoto sanitário sintético (ESS) promoveu maior percentagem de emergência do feijão-caupi em comparação com o tratamento no qual o substrato foi hidratado com água destilada (AD). O ESS tem a capacidade de fornecer água e nutrientes para as plantas (Jasim et al., 2016), tais como, nitrogênio amoniacal e nitratos, potássio, fósforo, magnésio e micronutrientes. Possivelmente, alguns desses nutrientes presentes no ESS proporcionaram efeitos positivos na emergência do feijão-caupi. Dentre os nutrientes, os nitratos atuam positivamente na germinação como moléculas de sinal. Estudos realizados por Miladinov et al. (2020) mostraram que o nitrato de potássio, além do impacto positivo na germinação, proporcionou redução da atividade da peroxidação lipídica e promoveu o aumento da atividade de antioxidantes, que são importantes para superar o estresse abiótico.

Tabela 4 - Resumo da análise de variância e médias de percentual de emergência, índice de velocidade de emergência (IVE) e tempo requerido para a emergência de 50% das sementes (T50) do feijão-caupi cultivado em substratos que receberam diferentes doses de hidrogel (HGEL) e que foram hidratados com diferentes fontes hídricas (FH) de água destilada (AD) ou esgoto sanitário sintético (ESS)

Doses de HGEL(%)	Emergência (%)		IVE		T50	
	AD	ESS	AD	ESS	AD	ESS
0,00			11,26 a	12,03 a	3,62 a	3,55 a
0,02			8,92 a	9,08 a	3,74 b	4,20 a
0,04			8,09 b	10,65 a	3,79 a	3,56 a
0,06	58,1 b	61,7 a	8,66 a	7,21 b	3,63 b	4,25 a
0,08			6,04 a	5,23 a	4,26 a	4,57 a
0,10			3,62 a	4,32 a	4,66 a	4,78 a
0,12			2,82 a	3,23 a	4,73 a	4,29 b
0,14			1,99 a	2,31 a	5,27 a	5,30 a
HGEL	5,33E+3**		9,27E+1**		2,67E-0**	
FH	2,10E+2**		1,75E+0 ^{ns}		1,64E-1 ^{ns}	
HGEL*FH	1,11E+2 ^{ns}		2,79E+0**		2,48E-1**	
CV (%)	2,39		10,98		5,23	

Dentro de cada variável analisada as médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem as fontes hídricas entre si para cada dose de hidrogel pelo teste Tukey ao nível de significância de 0,05.

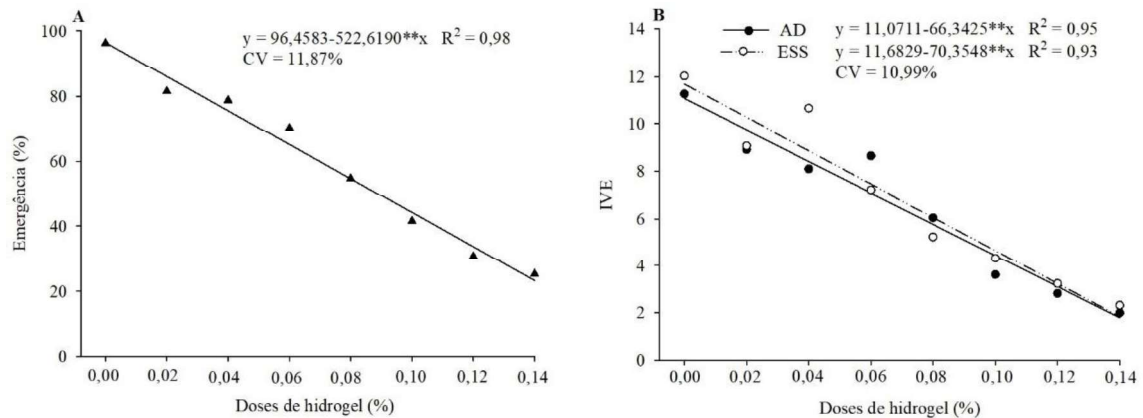
As interações entre hidrogel e fontes hídricas (FH) foram significativas para IVE e T50 do feijão-caupi (Tabela 4). Para a maioria das doses de hidrogel, a forma de hidratação do substrato não provocou diferenças nas variáveis IVE e T50, com exceção da dose de 0,04 e 0,06% de hidrogel para o IVE e as doses de 0,02, 0,06 e 0,12% de hidrogel para a variável T50. Nas doses que foram observados efeito da fonte de hidratação, não houve um tratamento que se destacasse. Isso aconteceu, possivelmente, pelo fato dos efeitos benéficos proporcionados pelas fontes hídricas se anularem.

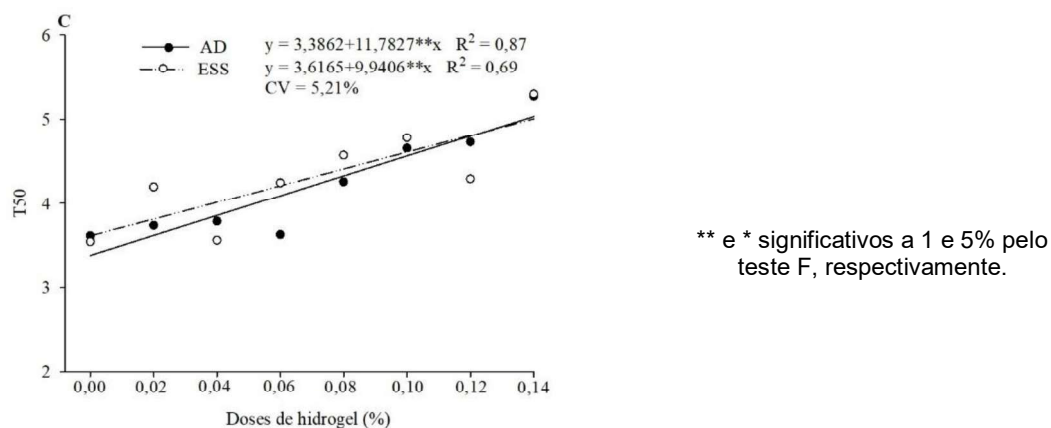
Apesar da maior retenção de água nos substratos hidratados com ESS (Tabela 2), a utilização de AD proporciona uma rápida absorção de água pelo hidrogel. Isso acontece pelo fato de a AD não apresentar sais dissolvidos em sua constituição, facilitando a retenção de água pelo hidrogel. Akhter et al. (2004) verificaram que a absorção de água pelo hidrogel foi mais rápida em AD, e atingiu o máximo em 4, 7 e 12 horas em AD, água da torneira e água salina, respectivamente. Os autores observaram que a absorção de água pelo hidrogel diminuiu com o aumento da

salinidade da água, sendo que o máximo de absorção ocorreu em água destilada (505 g g^{-1}); seguida de água da torneira (212 g g^{-1}) e água salina (140 g g^{-1}) durante o primeiro ciclo de hidratação.

São apresentados na Figura 4 alguns parâmetros relacionados a emergência do feijão-caupi em função de diferentes doses de hidrogel aplicadas nos substratos. As doses crescentes de hidrogel promoveram reduções no percentual de emergência e IVE do feijão-caupi, independente da fonte hídrica aplicada na hidratação da semente (Figuras 4A e B). O hidrogel agrícola é importante no aumento da retenção de água no substrato (Figura 2C), no entanto, quando aplicados próximos a semente, mesmo em pequenas concentrações (0,02%), podem atuar negativamente na germinação do feijão-caupi.

Figura 4 - Percentual de emergência (A); índice de velocidade de emergência (IVE) (B) e tempo requerido para a emergência de 50% das sementes (T50) (C) do feijão-caupi, cultivado com diferentes doses de hidrogel e hidratado com diferentes fontes hídricas de água destilada (AD) ou esgoto sanitário sintético (ESS)





Com a aplicação do hidrogel no substrato elevou-se a CE_{es} (Figuras 3A) e a capacidade de retenção de água no substrato (Figura 2A) e, conseqüentemente, o potencial osmótico foi reduzido. Isso dificultou a captação de água pelas sementes e influenciou negativamente em todas as variáveis de emergência do feijão-caupi (Figura 4). A embebição de água pela semente é importante para a retomada do metabolismo e o início de eventos celulares, e similarmente como ocorre no solo, o movimento de água para a semente decorre de um alto gradiente de energia para um baixo gradiente, ou seja, o potencial de água na célula das sementes é igual a soma do potencial osmótico, de pressão e o mátrico ($\psi_{cell} = \psi_o + \psi_p + \psi_m$).

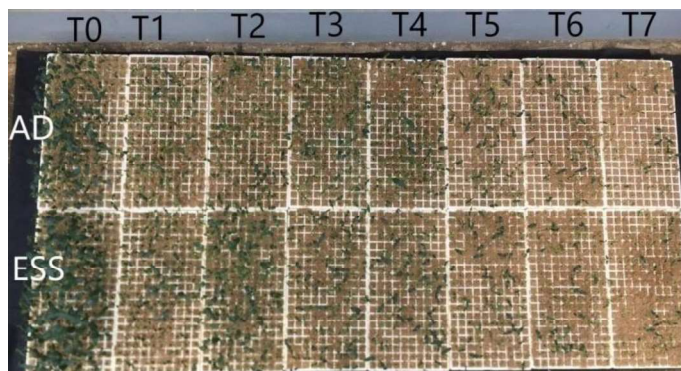
Alguns estudos mostraram benefícios à germinação de diferentes espécies a partir da aplicação de hidrogel agrícola (Su et al., 2017; Cassol et al., 2020; Zhang et al., 2020; Jang et al., 2021). Yonezawa et al. (2017) verificaram aumento de 20% na germinação do quiabo com a dose de 0,3% de hidrogel. Dessa forma, é possível entender que o conceito de água disponível é diferente para as sementes e para as plantas de feijão-caupi em desenvolvimento. Para o feijão-comum (IAC-Carioca), Forti et al. (2009) verificaram problemas na germinação das sementes em condição de disponibilidade hídrica de -40 kPa em relação às condições ótimas.

As doses crescentes de hidrogel promoveram aumento do T50 do feijão-caupi, independente da fonte hídrica aplicada na hidratação da semente (Figura 4C). Esse efeito é desvantajoso no processo de germinação, pois é preciso mais tempo para que ocorra emergência de 50% das sementes.

Na Figura 5 estão apresentadas imagens das bandejas com plântulas de feijão-caupi aos 8 dias após a semeadura para todos os tratamentos impostos. Nessa figura

é possível verificar a redução de plântulas em função do aumento das doses de hidrogel, evidenciando os problemas de germinação. A emergência de plântulas, quando reduzida e/ou desuniforme, pode conduzir a atrasos no desenvolvimento, problemas com o controle de plantas daninhas, desuniformidade da cultura em diversos estádios fenológicos, interferência na qualidade do produto e nas características da planta relacionadas a eficiência da colheita.

Figura 5 - Emergência das plântulas de feijão-caupi aos 8 dias após a sementeira, hidratada com água destilada (AD) ou esgoto sanitário sintético (ESS) em diferentes doses de hidrogel: T0 = 0; T1 = 0,02; T2 = 0,04; T3 = 0,06; T4 = 0,08; T5 = 0,10; T6 = 0,12 e T7 = 0,14%



3.4. Comprimento da parte aérea e conteúdo de água das plântulas

Na Tabela 5 são apresentados os valores de comprimento da parte aérea (CPA), teor relativo de água (TRA) e déficit de saturação hídrica (DSH) das plântulas do feijão-caupi nas diferentes combinações de fontes hídricas e doses de hidrogel. As fontes hídricas proporcionaram efeito isolado no CPA das plântulas de feijão-caupi. Nas doses de 0,00 e 0,04% de hidrogel, a hidratação com esgoto sanitário sintético (ESS) proporcionou maiores valores de CPA e nas doses de 0,02; 0,06 e 0,08% de hidrogel a hidratação com água destilada (AD) proporcionou maiores CPA de plântulas de feijão-caupi.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância e médias de comprimento da parte aérea (CPA), teor relativo de água (TRA) e déficit de saturação hídrica (DSH) de plântulas do feijão-caupi cultivado em substratos que receberam diferentes doses de hidrogel (HGEL) e que foram hidratados com diferentes fontes hídricas (FH) de água destilada (AD) ou esgoto sanitário sintético (ESS)

Doses de HGEL (%)	CPA (cm)		TRA (%)		DSH (%)	
	AD	ESS	AD	ESS	AD	ESS
0,00	11,33 b	14,38 a	79,79 a	76,87 b	20,21 b	23,13 a
0,02	9,50 a	7,25 b	73,69 a	72,33 b	26,31 b	27,67 a
0,04	10,50 b	12,50 a	80,80 a	71,51 b	19,20 b	28,49 a
0,06	10,38 a	6,63 b	80,40 a	80,14 b	19,60 b	19,86 a
0,08	8,17 a	6,38 b	80,54 a	74,21 b	19,46 b	25,79 a
0,10	6,63 a	6,13 a	80,54 a	71,90 b	19,46 b	28,10 a
0,12	5,75 a	6,38 a	80,85 a	76,43 b	19,15 b	23,57 a
0,14	4,75 a	5,75 a	79,56 a	72,99 b	20,44 b	27,01 a
HGEL	5,72E+1**		1,89E+1**		1,89E+1**	
FH	6,60E-1 ^{ns}		1,98E+2**		1,98E+2**	
HGEL*FH	1,05E+1 ^{ns}		1,09E+1**		1,09E+1**	
CV (%)	12,04		0,01		0,02	

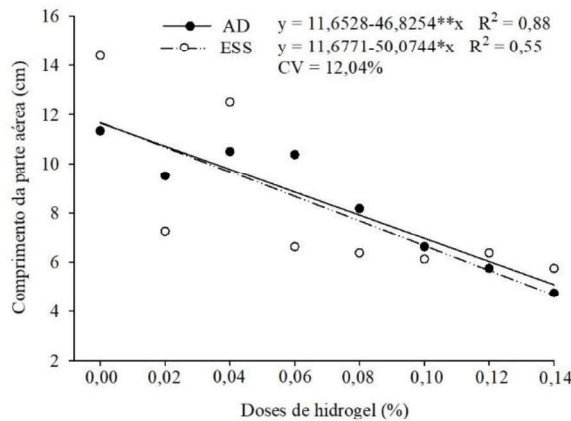
Dentro de cada variável analisada as médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem as fontes hídricas entre si para cada dose de hidrogel pelo teste Tukey ao nível de significância de 0,05.

As interações entre hidrogel e fontes hídricas (FH) foram significativas para TRA e DSH de plântulas do feijão-caupi (Tabela 5). Independente da dose de hidrogel, a hidratação com AD proporcionou maiores TRA e menores DSH em relação ao ESS. O ESS é composto por sais que promovem o aumento da salinidade perto das raízes e isso pode ter influenciado no menor teor relativo de água e maior déficit de saturação em comparação com AD. No entanto, a aplicação de nutrientes em condições de salinidade pode aliviar seus efeitos nocivos (Rahman et al., 2017), e com isso, não influenciou negativamente a altura de plântulas devido ao equilíbrio de elementos presentes no ESS.

Para as variáveis teor relativo de água e déficit de saturação hídrica de plântulas do feijão-caupi não foi possível ajustar os dados aos modelos polinomiais de primeiro e segundo grau. Na Figura 6 é apresentado o comportamento dos valores de comprimento da parte aérea das plântulas de feijão-caupi em função das doses de hidrogel para as duas fontes hídricas avaliadas. Observa-se que o aumento das doses de hidrogel promoveu uma redução linear na altura das plântulas hidratadas com água destilada e esgoto sanitário sintético. Esta redução também pode ser verificada na

Figura 7, onde estão apresentadas imagens das plântulas de feijão-caupi nos diferentes tratamentos aos 8 dias após a semeadura.

Figura 6 - Comprimento da parte aérea de plântulas de feijão-caupi hidratadas com água destilada (AD) ou esgoto sanitário sintético (ESS) em função de diferentes doses de hidrogel.



** e * significativos a 1 e 5% pelo teste F, respectivamente.

Figura 7 - Comprimento da parte aérea das plântulas de feijão-caupi de uma única repetição, aos 8 dias após a semeadura, hidratadas com água destilada (AD) ou esgoto sanitário sintético (ESS) em diferentes doses de hidrogel: T0 = 0; T1 = 0,02; T2 = 0,04; T3 = 0,06; T4 = 0,08; T5 = 0,10; T6 = 0,12 e T7 = 0,14%



O aumento das doses de hidrogel atuou negativamente em todas as variáveis de emergência, principalmente na competição da semente versus hidrogel pela água. Isso é devido o hidrogel possuir a característica de reter a água e disponibilizá-la lentamente, promovendo uma restrição hídrica inicial, resultando em uma germinação mais lenta e com menores alturas das plântulas. As sementes necessitam da água

livre para efetuar uma rápida absorção, germinação, emergência e um alongamento adequado do hipocótilo (Bewley; Black, 2013).

A redução da altura de plântulas em função do aumento das doses de hidrogel foi observada em sementes de *Cucumis sativus* L. (Alves; Teixeira, 2012). Rahman et al. (2017) verificaram em seu estudo que o comprimento da parte aérea e da raiz diminuiu significativamente com aumento dos níveis de CE_{es}. Diante disso, é necessário conhecer uma dose adequada de hidrogel para cada espécie e/ou determinar uma época adequada de aplicação, em que, maximize os efeitos positivos da aplicação de hidrogel e minimize os efeitos negativos oriundos dessa prática.

As regiões áridas e semiáridas apresentam problemas com a disponibilidade de água em quantidade e qualidade. Com isso, é um desafio constante adotar técnicas que possibilite uma gestão de água mais adequada para essas regiões. No presente trabalho, observou-se que o ESS é uma alternativa viável de fonte hídrica para ser usada na emergência do feijão-caupi cv. BRS Tumucumaque. Também foi observado que o hidrogel aumenta a retenção de água no substrato, no entanto, a aplicação próxima das sementes e com as doses crescentes influenciaram negativamente na emergência do feijão-caupi. Dessa forma, essa área do conhecimento demanda mais estudos para avaliar os efeitos do hidrogel agrícola no feijão-caupi, avaliar a distância espacial e/ou temporal que seja adequado para a aplicação dessa tecnologia.

4. CONCLUSÕES

A capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a água disponível no substrato aumentam com as doses crescentes de hidrogel nos substratos hidratados com água destilada ou esgoto sanitário sintético.

A condutividade elétrica, os sólidos dissolvidos totais e o pH aumentam com as doses crescentes de hidrogel no substrato hidratado com as diferentes fontes hídricas.

O uso de esgoto sanitário na emergência do feijão-caupi cv. BRS Tumucumaque aumenta a condutividade elétrica e os sólidos dissolvidos totais do substrato em comparação com a água destilada.

O hidrogel aplicado próximo das sementes afeta negativamente a emergência do feijão-caupi, independente da hidratação com água destilada ou esgoto sanitário.

O uso de esgoto sanitário possibilita maior emergência do feijão-caupi em comparação com a água destilada para as condições do presente estudo.

Com o aumento das doses de hidrogel ocorre uma redução da altura das plântulas de feijão-caupi, hidratado com água destilada ou esgoto sanitário.

REFERÊNCIAS

- Akhter, J., Mahmood, K., Malik, K. A., Mardan, A., Ahmad, M. & Iqbal, M. M. (2004). Effects of hydrogel amendment on water storage of sandy loam and loam soils and seedling growth of barley, wheat and chickpea. *Plant Soil and Environment*, 50(10), 463-469. <https://doi.org/10.17221/4059-PSE>
- Alves, M. C. & Teixeira, A. Z. A. (2012). The effect of hydrophilic gel from the second layer of Tingui (*Magonia pubescens* St. Hil.) seeds on germination and early development of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Estudos de Biologia*, 34(82), 61-66. <http://dx.doi.org/10.7213/reb.v34i82.22897>
- Ayers, R. S. & Westcot, D. N. (1999). FAO - Organização das Nações Unidas para a Agricultura e alimentação - A qualidade da água na agricultura. Campina Grande - PB: UFPB.
- Bernardo, S., Mantovani, E. C., Silva, D. D. & Soares, A. A. (2019). *Manual de irrigação*. 9 ed. In: Editora UFV, Viçosa-MG. 525 p.
- Bewley, J. D. & Black, M. (2013). *Seeds: physiology of development and germination*. Springer Science & Business Media.
- Brasil. (2009). *Regras para análise de sementes*. Brasília: MAPA/ACS.
- Carvalho, M., Matos, M., Castro, I., Monteiro, E., Rosa, E., Lino-Neto, T. & Carnide, V. (2019). Screening of worldwide cowpea collection to drought tolerant at a germination stage. *Scientia Horticulturae*, 247, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.082>
- Cassol, V. M., Fantinel, L. & Silva, W. L. (2020). Estudo e viabilidade do revestimento de sementes da soja no processo da germinação a partir do uso de polímero hidrogel de amido de milho. *Disciplinarum Scientia*, 21(1), 103-115. <https://doi.org/10.37779/dscnt.v21n1-008>
- Dias, N. S. & Blanco, F. F. (2010). Efeitos dos sais no solo e na planta. In: Gheyi, H. R., Dias, N. S., Lacerda, C. F. (Org.). *Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados*. 1ed. Fortaleza: INCT sal, v. 1, p. 129-141.
- Dourado Neto, D., Nielsen, D. R., Hopmans, J. W., Reichardt, K. & Bacchi, O. O. S. (2000). Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Scientia Agricola*, 57(1), 191-192. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000100031>
- Elgallal, M., Fletcher, L. & Evans, B. (2016). Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. *Agricultural Water Management*, 177, 419-431. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.027>
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016. Water NEWS: Climate Change & Water. <<http://www.fao.org/nr/water/news/clim-change.html>>

(Accessed 06.06.21).

- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. Land & Water. <<http://www.fao.org/land-water/water/water-scarcity/en/>> (Accessed 06.06.21).
- Farooq, M., Basra, S. M. A., Ahmad, N. & Hafeez, K. (2005). Thermal hardening: A new seed vigor enhancement tool in rice. *Journal of Integrative Plant Biology*, 47(2), 187-193. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2005.00031.x>
- Farooq, M., Rehman, A., Al-Alawi, A. K. M., Al-Busaidi, W. M. & Lee, D. J. (2020). Integrated use of seed priming and biochar improves salt tolerance in cowpea. *Scientia Horticulturae*, 272, 109507. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109507>
- Forti, V. A., Cicero, S. M. & Pinto, T. L. F. (2009). Efeitos de potenciais hídricos do substrato e teores de água das sementes na germinação de feijão. *Revista Brasileira de Sementes*, 31(2), 63-70. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222009000200007>
- Hydroplan, 2020. Superabsorventes Hydroplan-EB (SAP). Disponível <<http://www.hydroplan.com.br/gel-polimeros.html>> Acessado em 03/09/2020.
- Jang, S. N., Lee, G. O., Lee, S. M., Yun, J. G., Shin, H. & Son, K. H. (2021). Effect of super absorbent polymer on germination and growth of safflower and amaranth sprouts. *Journal of Bio-Environment Control*, 30(1), 37-45. <https://doi.org/10.12791/ksbec.2021.30.1.037>
- Jasim, S. Y., Saththasivam, J., Loganathan, K., Ogunbiyi, O. O. & Sarp, S. (2016). Reuse of treated sewage effluent (TSE) in Qatar. *Journal of Water Process Engineering*, 11, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.05.003>
- Leuther, F., Schlüter, S., Wallach, R. & Vogel, H. J. (2019). Structure and hydraulic properties in soils under long-term irrigation with treated wastewater. *Geoderma*, 333, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.015>
- Loy, S., Assi, A. T., Mohtar, R. H., Morgan, C. & Jantrania, A. (2018). The effect of municipal treated wastewater on the water holding properties of a clayey, calcareous soil. *Science of The Total Environment*, 643, 807-818. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.104>
- Maguire, J. D. (1962). Speed germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, 2, 176-177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- Mazen, A. M., Radwan, D. E. M. & Ahmed, A. F. (2015). Growth responses of maize plants cultivated in sandy soil amended by different superabsorbant hydrogels. *Journal of Plant Nutrition*, 38(3), 325-337. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.957393>
- Mendonça, T. G., Urbano, V. R., Peres, J. G. & Souza, C. F. (2013). Hidrogel como alternativa no aumento da capacidade de armazenamento de água no solo. *Water Resources and Irrigation Management*, 2(2), 87-92.

- Mendonça, T. G., Querido, D. C. M. & Souza, C. F. (2015). Eficiência do polímero hidroabsorvente na manutenção da umidade do solo no cultivo de alface. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 9(4), 239-245. <https://doi.org/10.7127/rbai.v9n400312>
- Miladinov, Z., Maksimović, I., Tubić, S. B., Đukić, V., Nikolić, Z., Milošević, B. & Katanski, S. (2020). Priming seeds-method for increasing the germination of soybean seeds under drought stress conditions. *Acta Agriculturae Serbica*, 25(50), 105-111. <https://doi.org/10.5937/aaser2050105m>
- Navroski, M., Araujo, M. M., Reiniger, L. R. S., Muniz, M. F. B. & Pereira, M. O. (2015). Influência do hidrogel no crescimento e no teor de nutrientes das mudas de *Eucalyptus dunnii*. *Floresta*, 45(2), 315-328. <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v45i2.34411>
- Nopens, I., Capalozza, C. & Vanrolleghem, P. A. (2001). Stability analysis of a synthetic municipal wastewater. Department of Applied Mathematics Biometrics and Process Control, University of Gent, Belgium.
- Parvathy, P. C., Jyothi, A. N., John, K. S. & Sreekumar, J. (2014). Cassava starch based superabsorbent polymer as soil conditioner: Impact on soil physico-chemical and biological properties and plant growth. *Clean Soil, Air, Water*, 42(11), 1610-1617. <https://doi.org/10.1002/clen.201300143>
- Pereira, J. S., Olszewski, N. & Silva, J. C. (2018). Retenção de água e desenvolvimento do feijão caupi em função do uso de polímero hidrorretentor no solo. *Engenharia na Agricultura*, 26(6), 582-591. <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i6.857>
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rahman, M., Zahan, F., Sikdar, S. I., El Sabagh, A., Barutçular, C., Islam, M. S. & Ratnasekera, D. (2017). Evaluation of salt tolerance mungbean genotypes and mitigation of salt stress through potassium nitrate fertilization. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(12), 7218-7226.
- Richards, L. A. (1949). Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science of American Journal*, 68(1), 95-112.
- Santos, H. T., Carvalho, D. F., Souza, C. F. & Medici, L. O. (2015). Cultivo de alface em solos com hidrogel utilizando irrigação automatizada. *Engenharia Agrícola*, 35(5), 852-862. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n5p852-862/2015>
- Satriani, A., Catalano, M. & Scalcione, E. (2018). The role of superabsorbent hydrogel in bean crop cultivation under deficit irrigation conditions: A case-study in Southern Italy. *Agricultural Water Management*, 195, 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.008>
- Su, L. Q., Li, J. G., Xue, H. & Wang, X. F. (2017). Super absorbent polymer seed coatings promote seed germination and seedling growth of *Caragana korshinskii* in

drought. *Journal of Zhejiang University*, 8(8), 696-706. <https://doi.org/10.1631/jzus.b1600350>

- Tunc, T. & Sahin, U. (2015). The changes in the physical and hydraulic properties of a loamy soil under irrigation with simpler-reclaimed wastewaters. *Agricultural Water Management*, 158, 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.012>
- Wagner Júnior, A., Negreiros, J. R. S., Alexandre, R. S., Pimentel, L. D. & Bruckner, C. H. (2007). Effect of water pH of soaking and of cracking of the seeds of the yellow passion fruit in the germination and initial development. *Ciência e Agrotecnologia*, 31(4), 1014-1019. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000400011>
- Yonezawa, U. G., Moura, M. R. & Aouada, F. A. (2017). Estado da arte: um estudo sobre polímeros biodegradáveis na germinação e desenvolvimento de plantas. *Caderno de Ciências Agrárias*, 9(2), 69-78.
- Zhang, W., Chen, J., Tao, J., Wang, P., Liu, Q. & Lei, Z. (2020). Effects of super absorbent polymers and gibberellin on germination and growth of alfalfa. *Legume Research - An International Journal*, 43(6), 800-804. <https://doi.org/10.18805/lr-532>

CAPÍTULO 2: GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL PARA FERTIRRIGAÇÃO DO FEIJÃO-CAUPI COM ESGOTO SANITÁRIO

RESUMO: A aplicação de esgoto sanitário utilizando o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial contribui para mitigar os problemas atuais de disponibilidade de água e produção de alimento. Assim, objetivou-se avaliar o feijão-caupi recebendo esgoto sanitário por gotejadores operando com diferentes vazões e instalados em distintas profundidades. Os gotejadores operaram com as vazões de 1,6 e 3,8 L h⁻¹ e foram instalados nas profundidades de 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 cm. O feijão-caupi foi cultivado em vasos de 65 L preenchidos com solo argiloso e mantidos em casa de vegetação. Utilizou-se esgoto sanitário sintético e a quantidade aplicada nos vasos foi baseada no limite máximo de adubação nitrogenada do feijão-caupi. O manejo da irrigação foi realizado por meio da umidade atual do solo, utilizando sondas de TDR. Foram avaliadas a germinação e respostas produtivas, fisiológicas e morfologia das raízes do feijão-caupi. A ascensão capilar, quando a água foi aplicada em profundidade, não foi suficiente para umedecer de maneira uniforme a superfície do solo. Assim, os parâmetros de germinação apresentaram um decréscimo em função do aumento das profundidades de instalação dos gotejadores nos dois ciclos realizados. A má distribuição da água com o aumento da profundidade dos emissores foi responsável pelos prejuízos nas respostas produtivas (número de vagens, grãos, produção etc.), fisiológicas (condutância estomática, taxa de assimilação de CO₂, transpiração etc.) e morfologia das raízes (massa, comprimento e volume) do feijão-caupi. As vazões dos gotejadores não afetaram a germinação do feijão-caupi. Já as respostas produtivas, fisiológicas e da morfologia das raízes não foram conclusivas para as duas vazões estudadas. Assim, mais estudos são necessários para investigar o efeito da vazão em gotejamento subsuperficial. Utilizar o sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial não é apropriado para fertirrigar o feijão-caupi com esgoto sanitário em áreas com solo argiloso.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*, ascensão capilar, irrigação localizada, germinação, gotejo enterrado.

CHAPTER 2: SUBSURFICIAL DRIP FOR FERTIRRIGATION OF COWPEA WITH MUNICIPAL WASTEWATER

ABSTRACT: The application of synthetic municipal wastewater (MWW) using the subsurface drip irrigation (SSDI) system contributes to mitigating the current problems of water availability and food production. Thus, the objective was to evaluate the cowpea receiving municipal wastewater through drippers operating at different flow rates and installed at different depths. The drippers operated with flows of 1.6 and 3.8 L h⁻¹ and were installed at depths of 0, 5, 10, 15, 20, 25, and 30 cm. Cowpea was cultivated in 65 L pots filled with clayey soil and kept in a greenhouse. Synthetic MWW was used and the amount applied in the pots was based on the maximum limit of nitrogen fertilization of the cowpea. Irrigation management was carried out using the current soil moisture, using TDR probes. The germination and productive, physiological, and root morphology responses of cowpea were evaluated. The capillary rise, when water was applied in-depth, was not enough to uniformly moisten the soil surface. Thus, the germination parameters presented a decrease as a function of the increase in the installation depths of the drippers in the two cycles performed. The poor distribution of water with the increase in the depth of the emitters was responsible for the losses in productive responses (number of pods, grains, production etc.), physiological (stomatic conductance, CO₂ assimilation rate, transpiration etc.), and root morphology (mass, length, and volume) of cowpea. The flow rates of the drippers did not affect cowpea germination. The productive, physiological, and root morphology responses were not conclusive for the two studied flows. Thus, further studies are needed to investigate the effect of flow on subsurface dripping. Using the SSDI system is not suitable for fertigating cowpea with synthetic MWW in areas with clayey soil.

Keywords: *Vigna unguiculata*, capillary rise, localized irrigation, germination, buried drip.

1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento populacional, e conseqüentemente a rápida poluição dos recursos naturais existentes, o aquecimento global e as mudanças climáticas estão aumentando a pressão sobre os recursos hídricos. Em 2025, mais de 60% da população mundial passará por alguma restrição de acesso a água (FAO, 2020a), seja por quantidade ou por qualidade. Além disso, as estimativas atuais são de que quase 690 milhões de pessoas, ou 8,9% da população mundial, passam fome (FAO, 2020b).

A irrigação é uma das principais alternativas para aumentar a disponibilidade de alimento em regiões áridas e semiáridas. No entanto, para mitigar o conflito do uso da água versus a produção de alimento nessas regiões, é interessante buscar estratégias que aumentem a produtividade maximizando a eficiência do uso da água pelas plantas. Estratégias melhores ainda podem ser alcançadas combinando essas últimas com a minimização da poluição dos corpos hídricos e redução da demanda por água potável.

O uso agrícola do esgoto sanitário (ES) é uma alternativa viável de disposição final dos resíduos líquidos, possibilitando diminuir a poluição de corpos d'água, preservar os recursos hídricos, disponibilizar água e nutrientes para as plantas e reciclar nutrientes para o solo (Araújo et al., 2020). A disposição de ES na agricultura deve ser criteriosa, pois a aplicação sem controle pode provocar salinização do solo, dispersão de argilas, contaminação das plantas, homem e ambiente. Assim, é de suma importância conhecer a interferência desta prática em características técnicas do sistema de irrigação, sobre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, avaliando-se sempre os riscos ambientais associados. Além disso, a escolha da cultura adaptada a região de interesse com base em sua capacidade produtiva, importância econômica e social é um dos primeiros passos quando se pensa em disposição de ES.

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) é uma cultura que se destaca dentre aquelas mais cultivadas nas regiões áridas e semiáridas. Essa leguminosa, de origem africana, constitui uma das principais fontes de proteína vegetal nas regiões mencionadas, desempenhando um importante papel na alimentação humana e na geração de emprego e renda. É uma cultura de ciclo curto e possui baixas exigências hídrica e de fertilidade do solo (Farooq et al., 2020), sendo ideal para ser cultivada em áreas com reaproveitamento de águas residuárias.

Para garantir uma maior eficiência no uso da água e realizar uma aplicação segura de ES é crucial a escolha adequada do sistema de irrigação. O sistema de irrigação por gotejamento é reconhecido como mais eficiente e seguro para a disposição de ES, pois evita o contato direto do ES com a parte aérea das plantas, reduzindo as chances de contaminação do ambiente, operador e consumidor (Santos et al., 2016).

O sistema de irrigação por gotejamento pode ser dividido entre irrigação de superfície (GS) e irrigação de subsuperfície (GSS). O GS apresenta alto potencial de eficiência de irrigação (85% - 95%) em nível de campo. Já a irrigação por GSS possui outras vantagens, tais como, redução de plantas daninhas, diminuição da perda de água devido à evaporação do solo (Nogueira et al., 2021), maior segurança na aplicação de águas residuárias (Liu et al., 2021) e rendimentos iguais ou superiores as culturas irrigadas por GS (Ma et al., 2020; Martínez-Gimeno et al., 2018; Selim et al., 2009).

Apesar dos benefícios conhecidos da irrigação por GSS, os sistemas subterrâneos podem em algumas situações não garantir a germinação e o estabelecimento das plantas. Além disso, o aumento da profundidade do emissor implica na diminuição dos rendimentos em algumas culturas e tipos de solo. Bozkurt e Mansuroglu (2018) verificaram que o *Phaseolus vulgaris* L. cultivado em casa de vegetação e irrigado com GSS instalado a 10 cm de profundidade apresentou uma produtividade superior ao tratamento com o GSS a 20 cm de profundidade.

Bhattarai et al. (2008) relataram uma redução do rendimento da soja com o aumento da profundidade do emissor ao longo da faixa de 5-35 cm. Os autores justificaram que o GSS em maior profundidade, particularmente em solos argilosos, induz a deficiência de oxigênio na rizosfera e reduz o volume de raiz, impondo uma restrição sobre a habilidade da planta em extrair água e nutrientes. Assim, percebe-se a importância de definir a melhor profundidade de instalação dos gotejadores em sistema subsuperficial.

A profundidade ideal do emissor é variável para o tipo de solo, cultura e, possivelmente, vazão do emissor. É consenso na literatura que o aumento da vazão dos gotejadores provoca acréscimos no tamanho de bulbo molhado em sistemas de irrigação por GS (Souza et al., 2018; Bernardo et al., 2019; Silva et al., 2020). Entretanto, em relação ao bulbo molhado e ascensão da água no perfil do solo em

sistemas por GSS, ainda não existe um consenso sobre a influência das vazões dos emissores. Existem estudos evidenciando que maiores vazões dos gotejadores aumenta a ascensão da água no perfil do solo (Vásquez et al., 2017, Nogueira et al., 2021) e outros estudos não mostram diferença (Elaiuy et al., 2015, Nazari et al., 2021). Além disso, os estudos que existem são com água de baixa salinidade, que em relação ao ES, podem apresentar comportamentos diferentes quanto a ascensão capilar.

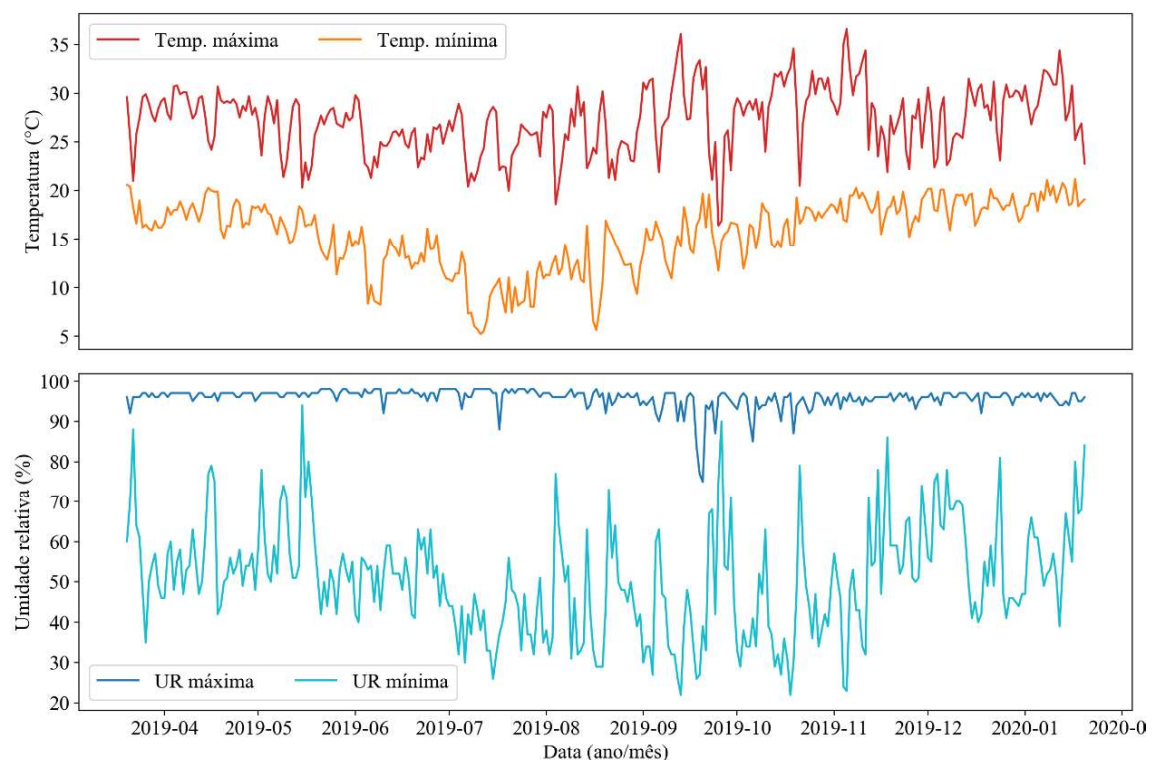
Diante do exposto, percebe-se que aplicar ES por meio de irrigação por GSS contribuirá para mitigação dos problemas atuais de disponibilidade de água versus produção de alimento. Entretanto, alguns fatores resultantes da associação dessas duas técnicas ainda não são compreendidos, necessitando de maiores estudos. Dessa forma, objetivou-se neste trabalho avaliar as respostas produtivas, fisiológicas e morfologia das raízes do feijão-caupi fertirrigado com ES aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e instalados em distintas profundidades.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Condições locais dos experimentos

Os trabalhos foram conduzidos em casa de vegetação instalada no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), situado no município de Viçosa-MG. As coordenadas geográficas são: 20°46'18,97" S, 42°52'28,19" W, Datum WGS-84, possuindo altitude de 651 m. O período dos trabalhos foi de março de 2019 a fevereiro de 2020. Na Figura 1 são apresentadas as variações dos elementos meteorológicos ocorridos no interior da casa de vegetação durante o período experimental.

Figura 1 - Comportamento da temperatura máxima e mínima do ar e umidade relativa máxima e mínima durante o período de condução dos experimentos



2.2 Tratamentos e delineamento experimental

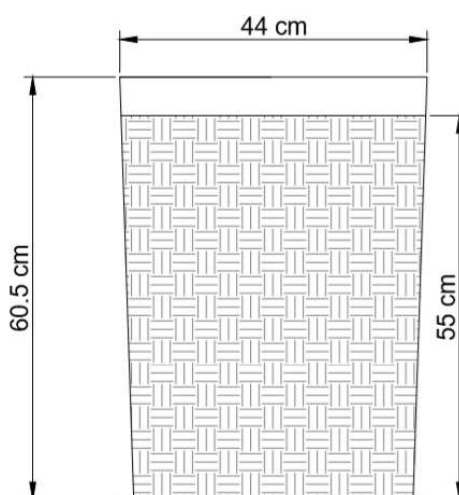
O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições e tratamentos arranjados em esquema de parcelas subdivididas. As parcelas

principais consistiram em emissores de diferentes vazões e as subparcelas foram compostas pelas diferentes profundidades de instalação do gotejador. As parcelas experimentais consistiram nos seguintes tratamentos: T1: vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ e T2: $3,8 \text{ L h}^{-1}$. As subparcelas foram compostas pelas seguintes profundidades de instalação do gotejo, S0: 0; S1: 5; S2: 10; S3: 15; S4: 20; S5: 25 e S6: 30 cm.

Para a condução do experimento foram utilizadas sementes comerciais não certificadas de primeira geração (S1) de feijão-caupi da cultivar BRS Tumucumaque. Os gotejadores utilizados foram do modelo AmnonDrip PC AS (autocompensante e antisifão) da marca NaanDanJain[®]. Procedeu-se a avaliação do sistema de irrigação antes do início dos experimentos, encontrando-se um CUC de 100% para as duas vazões utilizadas (Bernardo et al., 2019).

As unidades experimentais foram compostas por vasos com volume de 65 L, com altura de 60,5 cm e diâmetros inferior e superior de 30 e 44 cm, respectivamente (Figura 2). Os vasos foram preenchidos com solo até a altura de 55 cm, deixando assim uma borda de 5,5 cm. O volume útil de solo foi de 58,9 L e a área útil a nível do solo foi de $0,1434 \text{ m}^2$.

Figura 2 - Croqui das unidades experimentais



2.3 Manejo de solo e água

O solo utilizado nos experimentos foi coletado na Área Experimental de Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa (UFV). O solo na área experimental foi classificado como Latossolo

Vermelho-Amarelo distrófico (Santos et al., 2018), e as características químicas e físico-hídricas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos químicos e físico-hídricos do solo antes da implantação dos experimentos

pH	¹ MO	² P	² K	³ Ca	³ Mg	⁴ SB	⁵ t	⁶ T	⁷ H+Al
H ₂ O	dag kg ⁻¹	mg dm ⁻³	dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³					
5,8	1,88	4,6	20,0	1,01	0,50	1,56	1,56	4,20	2,64
⁸ S	² Cu	² Fe	² Mn	² Zn				⁹ Prem	¹⁰ V
mg dm ⁻³							mg L ⁻¹	%	
25,3	3,0	68,2	33,1	4,7				21,6	37,1
¹¹ CC	¹² PMP	¹³ Ds	Areia	Silte	Argila	Classificação Textural			
m ³ m ⁻³		g cm ⁻³	dag kg ⁻¹			-			
0,376	0,254	1,17	52	12	36	Argiloso			

¹Matéria orgânica, determinada por colorimetria; ²Extrator: Mehlich⁻¹; ³Extrator: KCl 1 M; ⁴SB - Soma de bases; ⁵CTC efetiva; ⁶T: CTC a pH 7; ⁷Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0; ⁸Extrator - Fosfato monocálcico em ácido acético; ⁹Fósforo remanescente, determinado em solução equilíbrio de P; ¹⁰V - Saturação por bases; ¹¹Capacidade de campo, ¹²Ponto de murcha permanente e ¹³Densidade do solo.

A adubação do feijão-caupi foi calculada com base na análise química do solo. Inicialmente foi realizada a calagem do solo com a dose de calcário de 0,10 kg m⁻³ de solo (Ribeiro et al., 1999). A correção da fertilidade do solo seguiu as recomendações de Melo et al. (2005) para atender a demanda nutricional do feijão-caupi com 6,7 g m⁻³ de N, 20 g m⁻³ de P₂O₅ e 13,3 g m⁻³ de K₂O. Todo o nitrogênio foi aplicado via esgoto sanitário sintético, considerando a recomendação do elemento limitante (Matos & Matos, 2017).

Para simular o esgoto sanitário, utilizou-se a solução de origem sintética (Nopens et al., 2001). Os sais e ingredientes foram diluídos em água de abastecimento. Os compostos utilizados para o preparo do esgoto sanitário sintético são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição teórica e respectivas concentrações para a produção de 1 litro de esgoto sanitário sintético. Fonte: Adaptado de Nopens et al. (2001)

Sais	Quant. ¹	DQO	N	P	K
mg L ⁻¹					
Ureia	92	23	43	0	0
MAP	13	0	1	3	0

Acetato de sódio*	132	79	0	0	0
Peptona	17	17	1	0	0
MgSO ₄	20	0	0	0	0
KH ₂ PO ₄	23	0	0	5	7
KCl	25	0	0	0	13
FeSO ₄ 7H ₂ O	5,8	0	0	0	0
Ingredientes					
Amido	122	122	0	0	0
Leite em pó	116	116	7	1	0
Fermento	52	52	6	0	0
Óleo de soja	29	29	0	0	0
Total	646	439	58	10	15

¹Massa de sais e ingredientes para produção de 1 L de esgoto sanitário sintético *Acetato de sódio hidratado.

O manejo da irrigação foi realizado por meio do balanço hídrico do solo. Diariamente efetuava-se o monitoramento da umidade inserindo sondas do tipo reflectometria no domínio do tempo (TDR), nas laterais dos vasos em cinco profundidades (7,5; 15; 22,5; 30; 37,5 cm) (Souza et al., 2006), as guias tinham 20 cm de comprimento. O tratamento com sistema de gotejamento superficial foi usado como padrão para calcular a demanda hídrica para os demais tratamentos, padronizando assim o volume de água aplicado em todas as parcelas. Todo o volume de esgoto sanitário aplicado, calculado pelo elemento limitante, foi insuficiente para atender a demanda hídrica de todo o ciclo de cultivo do feijão-caupi. Dessa forma, houve complementação com água de boa qualidade para reposição daquela água perdida por evapotranspiração nos vasos.

2.4 Emergência do feijão-caupi

O primeiro trabalho foi realizado a fim de verificar a capacidade dos sistemas de gotejo, instalados em diferentes profundidades, garantir a emergência e estabelecimento do feijão-caupi. Nesta etapa, realizou-se dois ciclos de avaliação de emergência entre março e abril de 2019.

A semeadura de feijão-caupi foi realizada na profundidade de três centímetros e seis sementes por vaso. A contagem das plântulas emergidas foi realizada diariamente, contabilizando-se as plântulas que apresentavam os cotilédones totalmente expandidos acima do solo, durante o período de 8 dias.

Foram avaliados o percentual de emergência (E) por meio da Equação 1 e o índice de velocidade de emergência (IVE) pela Equação 2 (Maguire, 1962). Aos 15 dias após a semeadura realizou-se a coleta das plantas e determinou-se a massa seca (g) pelo método da estufa, à 65 ± 3 °C por 72 h.

$$E = \frac{n}{N} \times 100 \quad (1)$$

$$IVE = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{t_i} \quad (2)$$

Em que, E é a porcentagem de emergência (%); n o número de sementes emergidas; N o número total de sementes; n_i é o número de sementes emergidas em cada dia; t_i o número de dias depois do início do teste em cada contagem.

2.5 Desenvolvimento e produtividade do feijão-caupi

Com base nas informações geradas nos primeiros experimentos observou-se a necessidade de realizar irrigações superficiais até o oitavo dia após a semeadura. Esse período é suficiente para emergência do feijão-caupi segundo Brasil (2009). Assim, foi possível garantir o estabelecimento das plantas em todas as parcelas experimentais e possibilitar a realização do experimento para avaliar o efeito no desenvolvimento e produtividade do feijão-caupi.

Na segunda etapa do estudo (avaliação do desenvolvimento e produtividade do feijão-caupi), a semeadura foi realizada no dia 26 de agosto de 2019, semeando-se o feijão-caupi na profundidade de três centímetros e seis sementes por vaso. Posteriormente, foram mantidas apenas duas plantas por vaso. A adubação de plantio foi realizada utilizando super-simples e cloreto de potássio.

As aplicações de esgoto sanitário (ES) foram iniciadas aos 10 dias após a semeadura do feijão-caupi, realizando-se uma aplicação a cada 5 dias. Todo o nitrogênio foi aplicado via ES por meio da fertirrigação, parcelado em 10 vezes e totalizando uma lâmina de 65 mm de ES.

2.5.1 Desenvolvimento e variáveis produtivas

Aos 47 dias após a semeadura (DAS) realizou-se as medições do diâmetro do caule ao nível do solo (DCS) (Burridge et al., 2016) e o diâmetro do caule a 3 cm do

solo (DC3) (Pereira Filho et al., 2017). Para essas medições foi utilizado um paquímetro digital.

As colheitas foram iniciadas aos 85 DAS e finalizadas aos 141 DAS, totalizando seis colheitas ao longo do período experimental. As variáveis de produção avaliadas foram: número de vagens por planta (V/P), grãos por vagem (G/V), peso de mil sementes (PMS), início da colheita (IC), final da colheita (FC), período produtivo (PP) e produção de grãos por vaso. Os grãos secos foram corrigidos para 13% de umidade.

2.5.2 Fisiologia do feijão-caupi

As avaliações fisiológicas foram realizadas quando as plantas de todos os tratamentos estavam na fase reprodutiva (Ferraz et al., 2012). A umidade do solo foi elevada para a capacidade de campo um dia antes das avaliações, considerando-se como padrão o volume de água calculado para o tratamento com o gotejamento superficial. No dia seguinte a irrigação, a umidade do solo foi monitorada em todos os vasos na superfície do solo (sonda TDR inserida em posição vertical) e em cinco camadas (7,5; 15; 22,5; 30; 37,5 cm).

Para a avaliação do teor relativo de água (TRA) e o déficit de saturação hídrica (DSH), retirou-se em cada planta 20 discos foliares de 1 cm de diâmetro e determinaram-se as massas frescas (MF). Após a pesagem, os discos foliares de cada tratamento foram submersos em água destilada (AD) por um período de 24 h. Posteriormente, os discos foliares foram retirados da AD e enxugados e pesados novamente para a obtenção da massa máxima ou túrgida (MM). Em seguida, estas folhas foram colocadas para secar em estufa à temperatura em torno de 70 °C, até a obtenção da massa seca constante (MS) (Barrs e Weatherley, 1962). Com estes dados calculou-se o TRA e o DSH por meio das Equações 3 e 4, respectivamente.

$$TRA = \frac{MF-MS}{MM-MS} \times 100 \quad (3)$$

$$DSH = \frac{MM-MF}{MM-MS} \times 100 \quad (4)$$

Em que, MF é a massa fresca dos discos foliares, g; MM a massa máxima dos discos foliares, após imersão em água destilada, g; MS a massa seca dos discos foliares, g.

Avaliou-se também a condutância estomática (g_s ; $\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a fotossíntese (A ; $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}$), transpiração (E ; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e concentração interna de CO_2 (C_i ; $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2}$) com o auxílio de um medidor de fotossíntese (Infrared Gas Analyzer - IRGA, marca ADC BioScientific Ltd, modelo LC-Pro+). Quantificou-se a eficiência no uso de água (EUA) (A/E) [$(\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1})^{-1}$] e a eficiência instantânea da carboxilação (E_iC) (A/C_i) [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$] (Silva et al., 2015). As medições foram realizadas na terceira folha totalmente expandida contada a partir do ápice da planta, entre 8 h e 12 h, utilizando-se uma fonte artificial de radiação de $1.500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e sob condições naturais de temperatura e concentração de CO_2 do ar.

Para determinação dos teores de clorofila a, b e total foi utilizado um medidor portátil clorofiLOG, modelo CFL 1030 (Falker). Realizou-se as leituras no período da tarde em folhas maduras do terço médio.

2.5.3 Desenvolvimento do sistema radicular

No final do experimento, dividiu-se o solo de cada tratamento em 5 camadas, 0-10; 10-20; 20-30; 30-40 e 40-55 cm. As raízes foram coletadas nas diferentes camadas e lavadas em água para eliminar fragmentos de solo. Em seguida, as raízes foram escaneadas e as imagens obtidas foram processadas pelo software WinRHIZO®. As variáveis avaliadas foram o comprimento das raízes (CR, cm), volume de raízes (VR, cm^3), diâmetro médio das raízes (DR, mm) e, por fim, as raízes foram secas em estufa à temperatura em torno de $70 \text{ }^\circ\text{C}$, até a obtenção da massa seca (MS).

Com exceção do diâmetro médio das raízes, para todas as variáveis foi calculado a soma total das 5 camadas, representando uma coluna de solo de 0-55 cm.

2.6 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando o teste F foi significativo a até 5%, aplicou-se a análise de regressão para o fator profundidade. Para a seleção do modelo de regressão mais adequado, os coeficientes dos modelos foram submetidos ao teste t, até 5% de significância, escolhendo-se apenas modelos

com coeficientes significativos e com capacidade para explicação biológica das variáveis analisadas. A fim de melhor estudar o impacto das diferentes vazões e profundidades sob as variáveis analisadas de forma integrada, empregou-se também duas análises multivariadas, a análise de componentes principais e a análise de agrupamento k-means.

3 RESULTADOS

3.1 Emergência do feijão-caupi

Nos dois ciclos de avaliação, as variáveis emergência, índice de velocidade de emergência (IVE) e massa seca das plântulas do feijão-caupi foram influenciadas significativamente pelas profundidades de instalação dos gotejadores (Tabela 3). No entanto, não foram influenciadas pela vazão dos emissores.

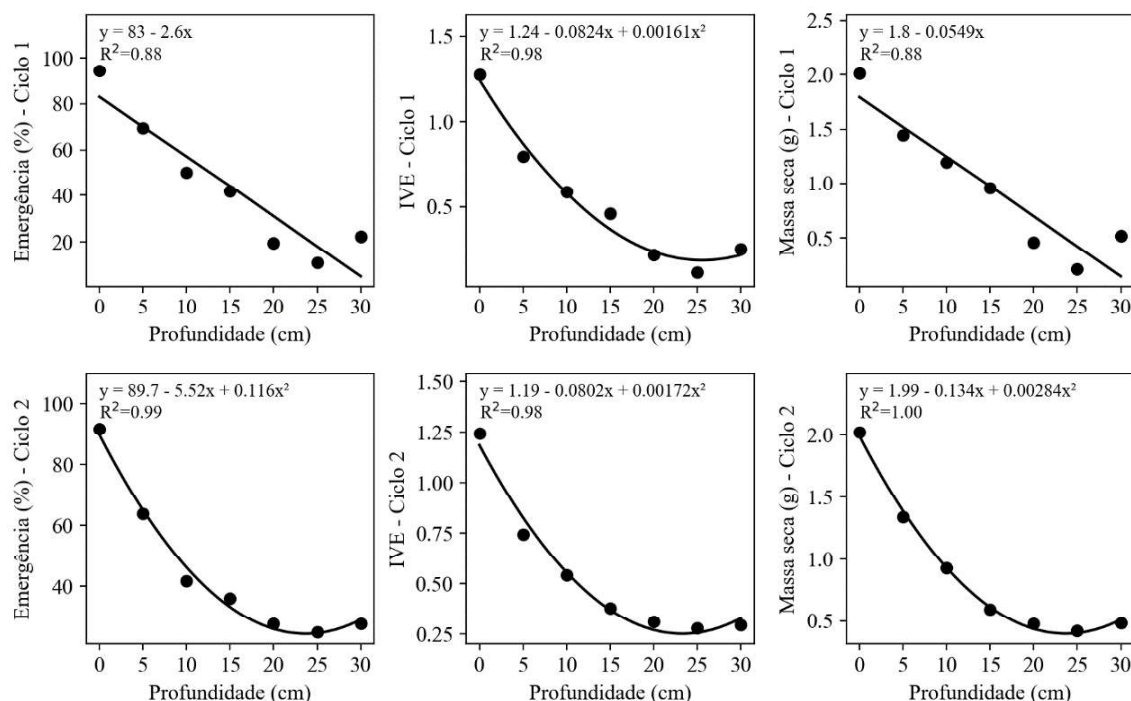
Tabela 3 - Resumo da análise de variância da emergência, índice de velocidade de emergência (IVE) e massa seca (MS) das plântulas do feijão-caupi em dois ciclos irrigados utilizando gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação

Variáveis	Fonte de variação			CV (%)
	Q	Prof.	Q * Prof.	
Emerg. 1	3,24E+2 ^{ns}	5,39E+3 ^{***}	3,09E+2 ^{ns}	62,61
IVE 1	4,87E-2 ^{ns}	9,70E-1 ^{***}	4,05E-2 ^{ns}	64,12
MS 1	1,40E-1 ^{ns}	2,41E+0 ^{**}	1,70E-1 ^{ns}	68,86
Emerg. 2	8,00E+2 ^{ns}	3,62E+3 ^{***}	5,53E+2 ^{ns}	52,20
IVE 2	1,57E-1 ^{ns}	7,41E-1 ^{***}	1,04E-1 ^{ns}	56,55
MS 2	2,12E-1 ^{ns}	2,13E+0 ^{***}	2,10E-1 ^{ns}	53,48

Quadrados médios seguidos de ^{***}, ^{**} e ^{*} são significativos a 0,1, 1 e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo pelo teste F.

Na Figura 3, observa-se que todas as variáveis estudadas nos dois ciclos de cultivo apresentaram um decréscimo em função do aumento das profundidades de instalação dos gotejadores. Ajustaram-se modelos lineares para o decaimento da emergência e massa seca no primeiro ciclo de cultivo. Para o IVE do primeiro ciclo e emergência, IVE e massa seca das plântulas do feijão-caupi no segundo ciclo foram ajustados modelos quadráticos.

Figura 3 - Emergência, índice de velocidade de emergência (IVE) e massa seca das plântulas do feijão-caupi irrigado com gotejadores instalados em diferentes profundidades em dois ciclos de avaliação



Considerando o modelo gerado, a porcentagem de emergência do ciclo 1 foi de 83, 70, 57, 44, 31, 18 e 5% para as profundidades de instalação do gotejado de 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 cm, respectivamente. Para o segundo ciclo, a maior porcentagem de emergência foi de 89,7% para o sistema de gotejamento superficial e a menor emergência foi de 24% para o sistema de gotejamento na profundidade de 25 cm.

3.2 Desenvolvimento e produção do feijão-caupi

Na Tabela 4 é apresentado um resumo da análise de variância para as variáveis produtivas e de diâmetro do caule do feijão-caupi. Observa-se que ocorreu interação entre a vazão e a profundidade de instalação do gotejador apenas para a variável peso de mil sementes (PMS). Para as demais variáveis, com exceção de G/V e FC, apenas o fator profundidade foi significativo. No caso das variáveis G/V e FC, tanto a vazão como a profundidade não apresentaram efeito significativo.

Tabela 4 - Resumo da análise de variância do diâmetro do caule a nível do solo (DCS), diâmetro do caule a 3 cm do solo (DC3), número de vagens/planta (V/P), grãos/vagem (G/V), peso de mil sementes (PMS), início (IC) e fim da colheita (FC), período produtivo (PP), produção (Prod.) e comparação de média do PMS do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação

Variáveis	Fonte de variação				CV (%)
	Q	Prof.	Q * Prof.		
DCS	2,32E-1 ^{ns}	6,97E+0 ^{***}	2,85E-1 ^{ns}		5,50
DC3	8,17E-1 ^{ns}	3,12E+0 ^{**}	3,03E-1 ^{ns}		13,15
V/P	8,01E+0 ^{ns}	2,02E+2 ^{***}	2,95E+0 ^{ns}		18,77
G/V	4,04E-2 ^{ns}	3,06E+0 ^{ns}	2,52E+0 ^{ns}		14,42
PMS	1,10E+2 [*]	3,91E+2 [*]	3,04E+2 [*]		4,74
IC	0,00E+0 ^{ns}	7,55E+2 ^{***}	5,56E+0 ^{ns}		7,07
FC	2,10E+2 ^{ns}	6,10E+1 ^{ns}	1,35E+1 ^{ns}		3,89
PP	2,10E+2 ^{ns}	1,03E+3 ^{***}	1,91E+1 ^{ns}		28,69
Prod.	1,64E+1 ^{ns}	3,37E+3 ^{***}	7,20E+1 ^{ns}		16,46

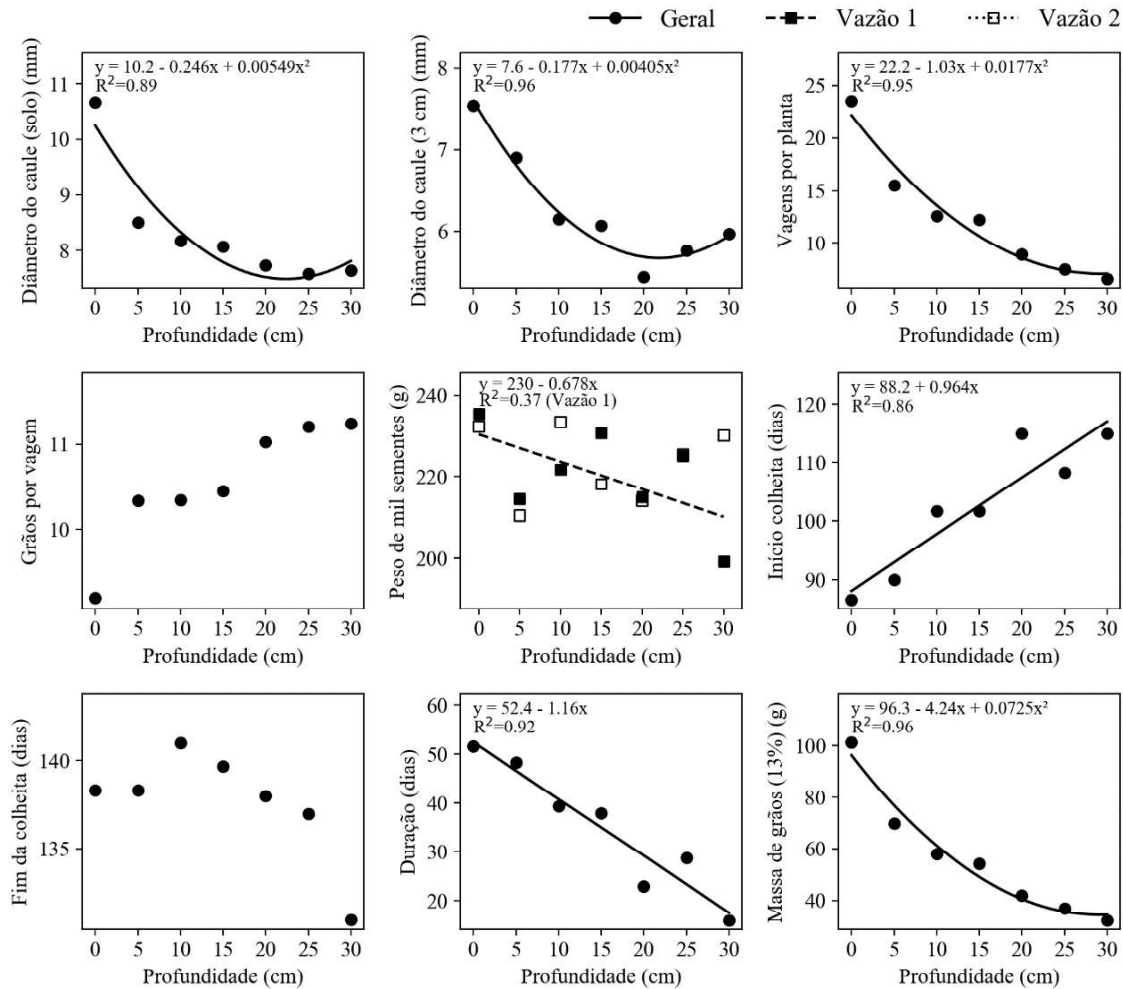
Variáveis	Vazão	Profundidade do gotejador (cm)						
		0	5	10	15	20	25	30
PMS	1,6	235,6 a	214,6 a	221,7 a	230,9 a	215,1 a	225,1 a	199,2 b
(g)	3,8	232,5 a	210,6 a	233,6 a	218,2 a	214,2 a	225,6 a	230,2 a

Quadrados médios seguidos de ^{***}, ^{**} e ^{*} são significativos a 0,1, 1 e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo pelo teste F. Dentro de cada profundidade de instalação do gotejador, médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si à 0,05 pelo teste F.

O desdobramento da interação da vazão dentro de cada profundidade de instalação do gotejador para a variável PMS pode ser observado na Tabela 4. Constatou-se que apenas na profundidade de instalação de 30 cm houve diferença entre as vazões estudadas. Para a vazão de 3,8 L h⁻¹ o PMS foi superior em 15,58% em relação ao PMS do feijão-caupi encontrado na vazão de 1,6 L h⁻¹.

Para a profundidade de instalação dos gotejadores dentro de cada vazão dos emissores realizou-se o ajuste de modelos de regressão. Para a vazão de 1,6 L h⁻¹ foi possível ajustar um modelo linear significativo com um R² de 0,37 (Figura 4). Apesar do baixo coeficiente de determinação, observa-se uma tendência de redução do PMS com o aumento da profundidade dos gotejadores.

Figura 4 - Diâmetro do caule a nível do solo, diâmetro do caule a 3 cm do solo, número de vagens/planta, grãos/vagem, peso de mil sementes, início e fim da colheita, período produtivo e produção do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação



As variáveis do diâmetro do caule a nível do solo (DCS), diâmetro do caule a 3 cm do solo (DC3), número de vagens/planta (V/P), peso de mil sementes (PMS), início da colheita (IC), período produtivo (PP) e produção grãos por vaso (Prod.) foram influenciados significativamente pelas diferentes profundidades de instalação do gotejo (Tabela 4).

Na Figura 4, DCS e o DC3 do feijão-caupi apresentaram comportamento quadrático em função das diferentes profundidades de instalação dos gotejadores. Com base nos modelos ajustados, os menores DCS e DC3 são encontrados nas profundidades de instalação de gotejo a 22,40 e 21,85 cm, respectivamente. O DCS na profundidade de 22,40 cm foi 37,10% inferior ao gotejamento superficial, e para a

variável DC3 na profundidade de 21,85 cm foi 25,45% inferior ao gotejamento superficial.

O número de V/P e Prod. decresceu com o aumento da profundidade de instalação dos gotejadores. Para o gotejamento superficial (GS) encontrou-se 22,2 V/P e 96,3 g de grãos de feijão-caupi por vaso. Já para o gotejamento subsuperficial instalado a 30 cm foram 7,23 V/P e 34,35 g de grãos feijão-caupi.

O início da colheita variou linearmente com o aumento da profundidade de instalação dos gotejadores. Observa-se que o início da colheita para o GS foi aos 88 DAS e para a maior profundidade de instalação foi aos 117 dias. Resultado diferente foi encontrado para a duração do período produtivo, que decresceu linearmente com o aumento da profundidade de instalação. Para o GS durou cerca de 52 dias e para a profundidade de 30 cm durou 18 dias.

3.3 Fisiologia do feijão-caupi

No dia da avaliação dos parâmetros fisiológicos do feijão-caupi realizou-se a medição da umidade do solo por meio de uma sonda do tipo TDR. Observa-se que apenas na camada 1 (0-7,5 cm de profundidade) houve interação entre a vazão dos emissores e as diferentes profundidades de instalação dos gotejadores para a umidade do solo (Tabela 5).

Tabela 5 - Resumo da análise de variância da umidade superficial e nas diferentes camadas do solo no dia da avaliação dos parâmetros fisiológicos do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação

Variáveis	Fonte de variação				CV (%)
	Q	Prof.	Q * Prof.		
Umid. Sup.	1,38E-4 ^{ns}	3,41E-3 ^{***}	1,03E-4 ^{ns}		3,92
Umid. C1	2,10E-4 ^{ns}	3,93E-4 ^{***}	1,52E-4 [*]		2,76
Umid. C2	4,53E-4 ^{ns}	1,19E-3 [*]	2,99E-4 ^{ns}		6,24
Umid. C3	3,30E-5 ^{ns}	1,69E-3 ^{***}	2,16E-4 ^{ns}		5,13
Umid. C4	9,91E-4 ^{ns}	9,07E-4 [*]	6,60E-5 ^{ns}		5,59
Umid. C5	1,83E-3 ^{ns}	1,17E-3 [*]	3,42E-4 ^{ns}		5,62

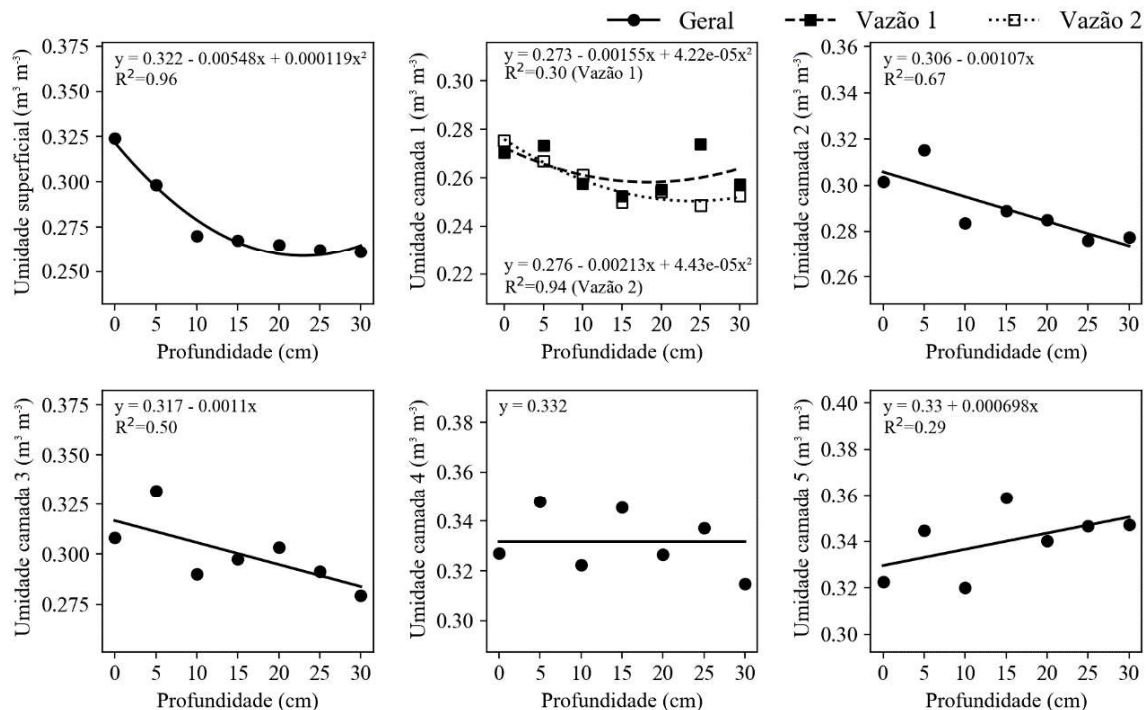
Variáveis Vazão		Profundidade do gotejador (cm)						
		0	5	10	15	20	25	30
Umid. P1	1,6	0,270 a	0,273 a	0,257 a	0,253 a	0,255 a	0,274 a	0,257 a
(m ³ m ⁻³)	3,8	0,275 a	0,267 a	0,261 a	0,250 a	0,254 a	0,249 b	0,253 a

Quadrados médios seguidos de ***, ** e * são significativos a 0,1, 1 e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo pelo teste F. Camada de monitoramento da umidade, Sup. = sonda inserida na vertical da superfície do solo; C1 = 7,5; C2 = 15; C3 = 22,5; C4 = 30 e C5 37,5 cm. Dentro de cada profundidade de instalação do gotejador, médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si à 0,05 pelo teste F.

A umidade do solo na camada 1 foi maior para o emissor com vazão de 1,6 L h⁻¹ e instalado na profundidade de 25 cm em comparação com o emissor de vazão de 3,8 L h⁻¹ (Tabela 5). Devido a interação que ocorreu para a umidade do solo na camada 1, ajustou-se modelos quadráticos para as diferentes profundidades de instalação dentro das diferentes vazões. As maiores umidades na camada 1, considerando-se as duas vazões individualmente, foram encontradas no tratamento com gotejamento superficial. Levando-se em consideração os modelos ajustados, as menores umidades encontradas para as vazões de 1,6 e 3,8 L h⁻¹ foram nas profundidades dos gotejadores de 18,4 e 24,04 cm, respectivamente (Figura 5).

Com exceção da umidade na camada 5, e o não ajuste de um modelo para a camada 4, para as demais camadas a umidade foi maior para o gotejamento superficial em comparação com as demais profundidades de instalação do gotejo (Figura 5).

Figura 5 - Umidade superficial e umidade nas diferentes camadas do solo (Profundidade de monitoramento da umidade, superficial = sonda inserida na vertical da superfície do solo; camada 1 = 7,5; camada 2 = 15; camada 3 = 22,5; camada 4 = 30 e camada 5 37,5 cm) no dia da avaliação dos parâmetros fisiológicos do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação



Para as variáveis fisiológicas estudadas, apenas para a condutância estomática (gs), clorofila B (Clor. B) e a clorofila total (Clor. Total) apresentou interação entre a vazão dos emissores e as profundidades de instalação. No tratamento com gotejamento superficial, a gs foi maior para a vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ em comparação com a vazão de $3,8 \text{ L h}^{-1}$. Os valores de Clor. B e Clor. Total foram superiores na vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ para os tratamentos de gotejador superficial e a 5 cm de profundidade. Para essas mesmas variáveis, nas profundidades de instalação de 15 e 30 cm, observou-se valores superiores para a vazão de $3,8 \text{ L h}^{-1}$ (Tabela 6).

Tabela 6 - Resumo da análise de variância do teor relativo de água (TRA), déficit de saturação hídrica (DSH), condutância estomática (gs), taxa de assimilação de CO₂ (A), transpiração (E), concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência no uso de água (EUA), eficiência instantânea da carboxilação (A/Ci), clorofila A (Clor. A), clorofila B (Clor. B) e clorofila total (Clor. Total) e comparação de média da gs, clorofila B e total do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação

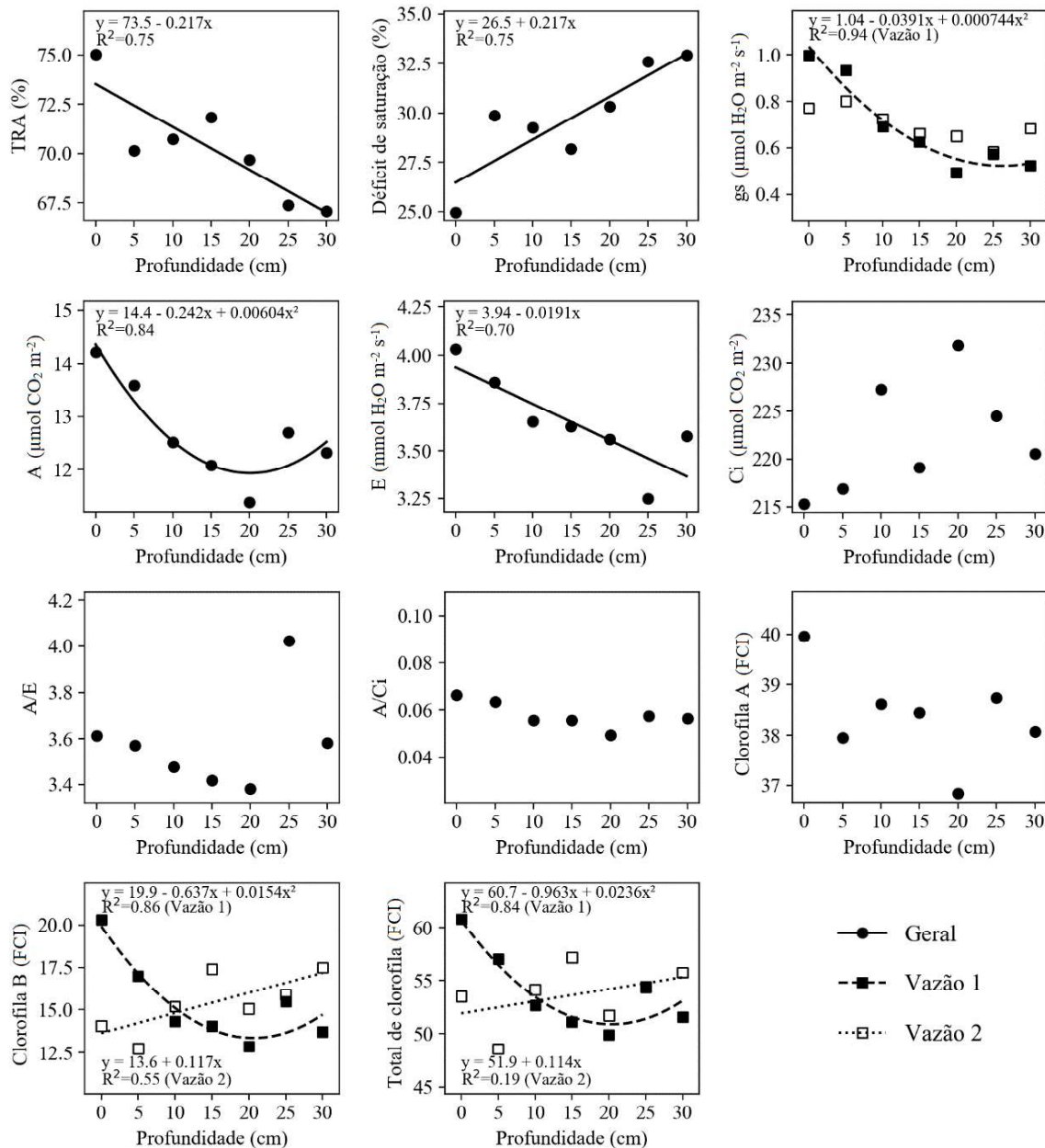
Variáveis	Fonte de variação			
	Q	Prof.	Q * Prof.	CV (%)
TRA	2,23E+1 ^{ns}	4,41E+1 ^{***}	6,10E+0 ^{ns}	3,08
DSH	2,22E+1 ^{ns}	4,41E+1 ^{***}	6,09E+0 ^{ns}	7,27
gs	2,62E-4 ^{ns}	1,06E-1 ^{***}	3,04E-2 [*]	14,81
A	1,08E+1 ^{ns}	5,38E+0 [*]	2,70E+0 ^{ns}	10,66
E	4,47E+0 ^{ns}	3,64E-1 [*]	9,32E-2 ^{ns}	10,16
EUA	8,48E+0 ^{ns}	2,74E-1 ^{ns}	1,90E-1 ^{ns}	17,81
Ci	5,39E+1 ^{ns}	2,13E+2 ^{ns}	3,32E+2 ^{ns}	8,07
A/Ci	2,44E-4 ^{ns}	1,89E-4 ^{ns}	8,20E-5 ^{ns}	16,34
Clor. A	1,23E+0 ^{ns}	5,33E+0 ^{ns}	6,50E+0 ^{ns}	4,20
Clor. B	1,02E-3 ^{ns}	6,16E+0 ^{ns}	2,21E+1 ^{***}	10,48
Clor. Total	1,16E+0 ^{ns}	2,19E+1 [*]	4,57E+1 ^{***}	5,22

Variáveis	Vazão	Profundidade do gotejador (cm)						
		0	5	10	15	20	25	30
gs ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	1,6	0,998 a	0,933 a	0,691 a	0,626 a	0,492 a	0,573 a	0,524 a
	3,8	0,771 b	0,800 a	0,724 a	0,661 a	0,650 a	0,584 a	0,683 a
Clor. B (FCI)	1,6	20,33 a	16,98 a	14,35 a	14,03 b	12,88 a	15,48 a	13,72 b
	3,8	14,06 b	12,75 b	15,19 a	17,40 a	15,07 a	15,88 a	17,49 a
Clor. Total (FCI)	1,6	60,80 a	57,04 a	52,66 a	51,14 b	49,91 a	54,47 a	51,57 a
	3,8	53,51 b	48,60 b	54,11 a	57,18 a	51,72 a	54,37 a	55,77 a

Quadrados médios seguidos de ***, ** e * são significativos a 0,1, 1 e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo pelo teste F. Dentro de cada profundidade de instalação do gotejador, médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si à 0,05 pelo teste F.

Para as variáveis gs, Clor. B e Clor. Total ajustou-se um modelo quadrático para explicar o efeito das diferentes profundidades dentro da vazão de 1,6 L h⁻¹. Observa-se um decaimento inicial para ambas as variáveis para o incremento das profundidades dos gotejadores e uma estabilização a um leve incremento nas maiores profundidades (Figura 6).

Figura 6 - Teor relativo de água, déficit de saturação hídrica, condutância estomática (gs), taxa de assimilação de CO₂ (A), transpiração (E), concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência no uso de água (EUA) (A/E), eficiência instantânea da carboxilação (A/Ci) e teores de clorofilas do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação



O teor relativo de água (TRA), o déficit de saturação hídrica (DSH), a condutância estomática (gs), a taxa de assimilação de CO₂ (A), transpiração (E), a concentração interna de CO₂ (Ci) e a clorofila total (Clor. Total) foram influenciadas

significativamente pelas diferentes profundidades de instalação do gotejo (Tabela 6). As variáveis TRA, DSH e E tiveram um comportamento linear, sendo decrescente para o TRA e E, e crescente para o DSH. A taxa de assimilação de CO₂ (A) teve um comportamento quadrático, com um rápido decréscimo com as primeiras profundidades e um leve incremento com as maiores profundidades testadas neste estudo.

3.4 Desenvolvimento do sistema radicular

A massa seca das raízes do feijão-caupi na camada de 40-55 cm (MS C5) e o comprimento das raízes na camada de 0-10 cm (CR C1) foram influenciadas significativamente pela interação entre a vazão dos emissores e as profundidades de instalação (Tabela 7). Nos tratamentos com os gotejadores instalados a 5 e 20 cm de profundidade, a MS C5 foi maior para a vazão de 1,6 L h⁻¹ em comparação com a vazão de 3,8 L h⁻¹. Já para as instalações dos gotejadores a 0, 10 e 30 cm, o CR P1 foi superior para a vazão de 1,6 L h⁻¹ em comparação com a vazão de 3,8 L h⁻¹ (Tabela 7).

Tabela 7 - Resumo da análise de variância da massa seca, comprimento, volume e diâmetro médio das raízes em diferentes camadas do solo e a comparação de média da massa seca na camada 5 e comprimento das raízes na primeira camada de solo cultivado com feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação

Variáveis	Fonte de variação			CV (%)
	Q	Prof.	Q * Prof.	
MS C1	5,51E+0 ^{ns}	17,63E+1 ^{***}	1,04E+0 ^{ns}	24,33
MS C2	4,05E-1 ^{ns}	3,67E+0 ^{***}	4,28E-1 ^{ns}	32,32
MS C3	2,24E+0 ^{**}	8,19E-1 ^{**}	2,37E-1 ^{ns}	31,01
MS C4	6,86E-1 ^{ns}	3,10E-1 ^{ns}	2,74E-1 ^{ns}	31,06
MS C5	1,64E+0 ^{ns}	7,24E-1 ^{ns}	1,69E+0 ^{**}	23,59
MS Total	4,34E+1 [*]	4,80E+1 ^{***}	5,11E+0 ^{ns}	17,52
CR C1	1,55E+8 [*]	8,02E+8 ^{***}	5,30E+7 ^{***}	17,77
CR C2	3,30E+6 ^{ns}	2,49E+8 ^{***}	1,24E+7 ^{ns}	73,06
CR C3	3,79E+7 ^{ns}	6,26E+7 ^{***}	5,51E+6 ^{ns}	30,07
CR C4	1,02E+7 ^{ns}	4,75E+7 ^{ns}	1,48E+7 ^{ns}	50,16
CR C5	4,97E+7 ^{ns}	1,98E+8 ^{ns}	1,98E+8 ^{ns}	45,58
CR Total	9,39E+8 ^{ns}	2,93E+9 ^{***}	3,07E+8 ^{ns}	31,48
VR C1	8,44E+1 ^{ns}	7,40E+2 ^{***}	3,25E+1 ^{ns}	42,62
VR C2	1,81E+0 ^{ns}	1,52E+2 ^{***}	1,60E+1 ^{ns}	47,89
VR C3	2,68E+1 [*]	4,18E+1 ^{**}	3,98E+0 ^{ns}	32,68

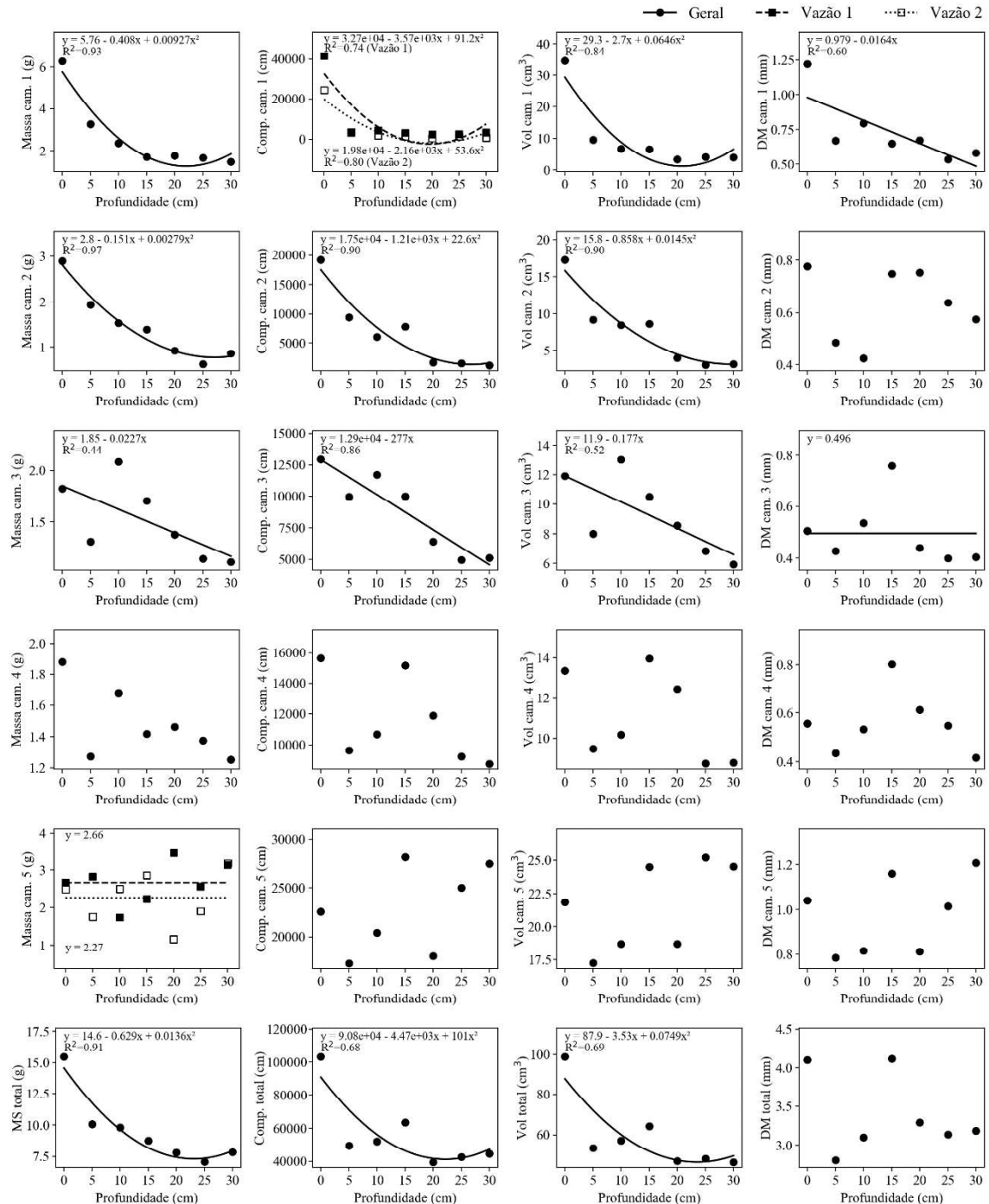
VR C4	2,19E+1 ^{ns}	2,92E+1 ^{ns}	1,25E+1 ^{ns}	45,45
VR C5	2,96E+1 ^{ns}	6,07E+1 ^{ns}	1,52E+2 ^{ns}	37,79
VR Total	6,67E+2 ^{ns}	2,08E+3 ^{***}	2,10E+2 ^{ns}	27,10
DR C1	1,31E-1 ^{ns}	3,16E-1 [*]	1,00E-1 ^{ns}	44,31
DR C2	3,17E-1 ^{ns}	1,18E-1 ^{ns}	7,40E-2 ^{ns}	42,12
DR C3	1,59E-3 ^{ns}	9,63E-2 [*]	24,7E-2 ^{ns}	33,01
DR C4	1,14E-2 ^{ns}	9,83E-2 ^{ns}	5,52E-2 ^{ns}	48,60
DR C5	1,60E-4 ^{ns}	1,83E-1 ^{ns}	2,40E-1 ^{ns}	38,35

Variáveis	Vazão	Profundidade do gotejador (cm)						
		0	5	10	15	20	25	30
MS C5 (g)	1,6	2,673 a	2,831 a	1,744 a	2,230 a	3,452 a	2,564 a	3,137 a
	3,8	2,491 a	1,758 b	2,507 a	2,861 a	1,160 b	1,906 a	3,181 a
CR C1 (cm)	1,6	41.549 a	3.244 a	4.410 a	3.307 a	2.520 a	2.538 a	3.544 a
	3,8	24.440 b	3.637 a	1.985 b	1.452 a	576 a	1.393 a	766 b

Quadrados médios seguidos de ***, ** e * são significativos a 0,1, 1 e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo pelo teste F. Camadas do solo avaliadas, C1 0-10; C2 10-20; C3 20-30; C4 30-40; C5 40-55 e total 0-55 cm. Dentro de cada profundidade de instalação do gotejador, médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si à 0,05 pelo teste F.

Os modelos de regressão ajustados para as variáveis radiculares em diferentes camadas de avaliação são apresentados na Figura 7. De uma maneira geral, observou-se uma redução das raízes nas camadas 1, 2 e 3 e na camada total com o aumento das profundidades de instalação dos gotejadores (Tabela 7 e Figura 7).

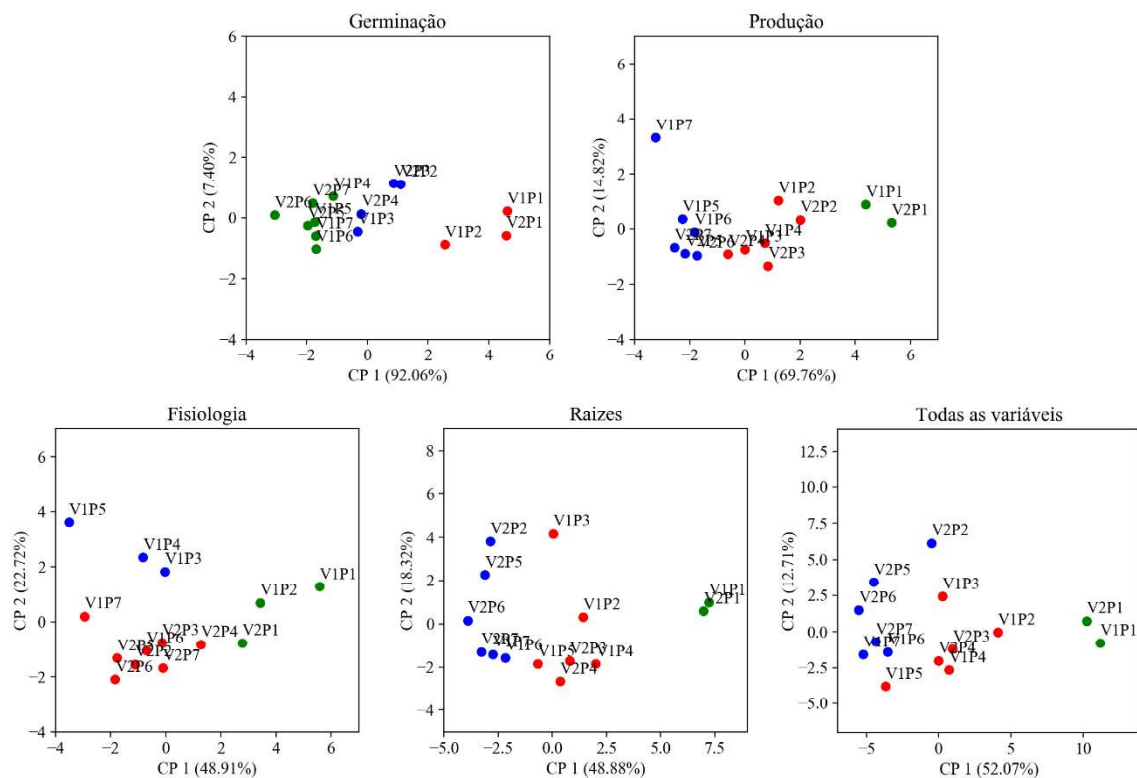
Figura 7 - Massa seca, comprimento, volume e diâmetro médio das raízes nas camadas do solo, C1 0-10; C2 10-20; C3 20-30; C4 30-40; C5 40-55 e total 0-55 cm do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação



3.5 Componentes principais e análise de agrupamento

Para entender melhor a influência das profundidades de instalação dos gotejadores e vazões dos emissores sob os conjuntos de variáveis estudados, a análise de componentes principais (ACP), juntamente com a análise de agrupamento k-means, foi realizada para cada conjunto de variáveis em estudo e para todas as variáveis conjuntamente (Figura 8).

Figura 8 - Componentes principais e análise de agrupamentos das diferentes vazões dos emissores (V1 e V2) e para as diferentes profundidades de instalação do gotejo (P1 a P7). Pontos de mesma cor pertencem a um mesmo grupo



De modo geral, verifica-se que os pontos referentes aos tratamentos com menor profundidade se distanciaram dos pontos de maior profundidade. Já para as vazões, não houve um padrão bem definido, corroborando com os resultados apresentados anteriormente, os quais indicaram baixa influência da vazão sobre as variáveis estudadas. Com base no agrupamento, verifica-se que, de modo geral, os tratamentos com GS ficaram alocados em um grupo e os demais tratamentos, referentes ao GSS, foram divididos em dois outros grupos.

4 DISCUSSÃO

Este estudo mostrou que a irrigação por gotejamento subsuperficial (GSS) não garante um estabelecimento adequado do feijão-caupi cultivado em solo argiloso (Figura 3). Independente da profundidade de instalação dos gotejadores houve ascensão capilar da água até a superfície do solo, pois as sementes de feijão-caupi germinaram em todos os tratamentos. Entretanto, a ascensão capilar nos sistemas de GSS não foi suficiente para umedecer de maneira uniforme a superfície do solo e, com isso, minimizar as barreiras para uma emergência adequada das plantas.

Esse resultado indica potenciais problemas com o uso de irrigação por GSS em solos argilosos. Esses tipos de solos podem apresentar elevada capacidade de compactação necessitando de intervenção mecânica. Caso a linha lateral com os gotejadores seja instalada em baixas profundidades, 5 a 10 cm, dificulta a realização do preparo de solo, pois o implemento utilizado para descompactá-lo pode danificar os tubos gotejadores. Por outro lado, caso a linha lateral seja instalada em maior profundidade, a emergência das plantas será comprometida pelo fato de a água não atingir as sementes em níveis adequados.

As diferentes vazões dos gotejadores não afetaram a germinação das sementes de feijão-caupi (Tabela 3). Possivelmente, isso aconteceu devido as vazões dos emissores também não terem influenciado a ascensão capilar da água no perfil do solo. Existem vários estudos mostrando que o aumento da vazão dos gotejadores proporciona maiores bulbos molhados (Souza et al., 2018; Bernardo et al., 2019; Silva et al., 2020). Assim, pode-se afirmar que a variação da vazão dos gotejadores altera a frente de umedecimento no sentido horizontal e vertical descendente, não afetando no sentido vertical ascendente, corroborando com Elaiuy et al. (2015) e Nazari et al. (2021).

Em virtude dos primeiros trabalhos de emergência, no segundo experimento houve a necessidade de padronizar o umedecimento inicial da superfície do solo. Dessa forma foi possível garantir o desenvolvimento e a conclusão do ciclo produtivo do feijão-caupi (Figura 4). Assim, para as condições de estudo, entende-se que a irrigação por GSS não foi suficiente para abrir uma safra de cultivo de feijão-caupi.

O diâmetro do caule a nível do solo (DCS) e o diâmetro do caule a 3 cm do solo (DC3) reduziram com o aumento das profundidades de instalação dos gotejadores e

estabilizaram a partir da profundidade de 20 cm (Figura 4). A redução do diâmetro do caule é uma resposta relacionada a restrição hídrica (Pereira Filho et al., 2017), que possivelmente ocorreu pela má distribuição de água ao longo do sistema radicular nas maiores profundidades de instalação dos emissores. A má distribuição da água com o aumento da profundidade dos emissores foi verificada na avaliação da umidade do solo (Figura 5). A umidade do solo decresceu até a camada de 22,5 cm em função da profundidade do gotejador, e só aumentou a umidade em função da profundidade do gotejador a partir da camada de 37,5 cm. Assim, percebe-se que o movimento predominante da água nos sistemas de GSS foi na vertical descendente, concentrando na última camada a maior umidade. Wu et al. (2019) observaram que o teor de umidade do solo na camada de 0-20 cm foi menor para o sistema de GSS instalado a 30 cm do que no sistema de GS no cultivo do milho em solos arenosos e argilosos.

Considerando a má distribuição da água e uma possível restrição hídrica provocados pelo sistema de GSS em comparação com o sistema de gotejo superficial (GS), as variáveis fisiológicas confirmam essa hipótese. Verifica-se na Figura 6 que o teor relativo de água (TRA), o déficit de saturação hídrica (DSH), a condutância estomática (g_s), a taxa de assimilação de CO_2 (A), transpiração (E) e a clorofila total (Clor. Total) foram influenciadas negativamente pelas diferentes profundidades de instalação do gotejador. Freitas et al. (2017) verificaram uma redução da g_s , A e E do feijão-caupi cultivado em condições de moderada e severa restrição hídrica em comparação com o controle sem restrição hídrica. A g_s e a fotossíntese são consideradas ótimos indicadores da resposta da planta a restrição hídrica, pois as reduções dessas variáveis são uma resposta a restrição hídrica provocado pelos tratamentos (Carvalho et al., 2019).

A massa seca, comprimento e volume de raízes nas camadas de 0-10; 10-20; 20-30 e total 0-55 cm, foram influenciados negativamente pelas maiores profundidades de instalação do gotejo (Figura 7). Isso ocorreu em função da menor umidade nas camadas superiores (Figura 5). Além disso, por ser um solo argiloso (Tabela 1), a redução da umidade possa ter aumentado a resistência à penetração do solo a valores que possam ter prejudicado o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular. Por outro lado, as camadas que receberam maior quantidade de

ES, podem ter sido beneficiadas por maior agregação das partículas do solo como resultado do aumento de matéria orgânica.

A distinção na dinâmica de água no solo em função do GS e GSS pode impactar o conteúdo de água do solo e, eventualmente, influenciar o crescimento e morfologia das raízes (Liu et al., 2021). Caso tenha menos água na zona efetiva das raízes (0-20 cm) e uma menor quantidade de raízes, conseqüentemente, a planta reduz a transpiração (Figura 6). A redução da transpiração influencia na redução do acúmulo de carbono e, conseqüentemente, no acúmulo de biomassa. Assim, observa-se um efeito negativo para a massa das plântulas (Figura 3) e para as variáveis produtivas (Figura 4) do feijão-caupi irrigado com GSS em comparação com o GS.

Observa-se que, no presente estudo, o ciclo de cultivo do feijão-caupi cultivar BRS Tumucumaque foi prolongado (Figura 4). Isto pode ter sido provocado pelo cultivo em casa de vegetação, e possível restrição luminosa e baixas temperaturas noturnas nos primeiros meses. Vale ressaltar que baixas temperaturas durante o período noturno podem prolongar o ciclo do feijão-caupi. Temperaturas inferiores a 19 °C aumentam o ciclo vegetativo e retardam o florescimento (Matoso et al., 2013). No sistema por GS a produção iniciou mais cedo e a duração do ciclo produtivo foi prolongado em comparação com as demais profundidades do GSS. Como os sistemas estavam conectados, a irrigação só foi cessada quando as plantas de todos os tratamentos tinham enchido os grãos, garantindo mais de uma produção no GS.

Bozkurt e Mansuroglu (2018) verificaram que o *Phaseolus vulgaris* L. cultivado em casa de vegetação e irrigado com GSS a 10 cm de profundidade apresentou uma produtividade superior ao tratamento com o GSS a 20 cm de profundidade. Bhattarai et al. (2008) relataram uma redução do rendimento da soja com o aumento da profundidade do emissor ao longo da faixa de 5-35 cm. Por outro lado, outros trabalhos relatam que a irrigação por GSS promove rendimentos iguais ou superiores as culturas irrigadas por GS (Ma et al., 2020; Martínez-Gimeno et al., 2018; Selim et al., 2009). Wu et al. (2019) verificaram que a irrigação por GS e GSS não apresentam diferença significativa na produtividade e na eficiência do uso da água do milho cultivado em solos arenosos e argilosos.

Os GSS tende ser mais eficiente em solos de textura média e em condições que o sistema é usado para fornecer uma complementação hídrica, visto que, dependendo da profundidade de instalação do gotejador, ele não garante um estande

adequado. Geralmente, em solos muito argilosos e com baixa condutividade hidráulica, ao realizar uma irrigação por GSS pode ocorrer uma contrapressão entre o solo e o tubo gotejador, e com isso, reduzir a vazão do emissor. Juntando essa redução na vazão, e o movimento lento da água no solo argiloso, principalmente por capilaridade, a restrição hídrica nas camadas iniciais em sistemas instalados acima de 20 cm deve ser levada em consideração no momento em decidir entre o GSS ou o GS. Essa restrição hídrica pode comprometer a produtividade da cultura e não garantir o retorno financeiro desejado pelo produtor.

O emissor com vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ se comportou melhor para as variáveis umidade do solo na profundidade de 0-7,5 cm, condutância estomática, clorofila total, massa seca das raízes na camada do solo de 40-55 cm e no comprimento das raízes na camada de 0-10 cm em comparação com o gotejador de vazão de $3,8 \text{ L h}^{-1}$. O solo argiloso apresenta uma baixa taxa de infiltração de água no solo, com isso, um emissor de menor vazão permite uma distribuição horizontal e vertical equilibrada. No caso, a maior vazão de $3,8 \text{ L h}^{-1}$ em solos argilosos promove um maior umedecimento horizontal na superfície do solo e com isso uma possível maior evaporação. No GSS a maior vazão pode possibilitar uma maior contrapressão e reduzir assim a lâmina aplicada ou criar caminhos preferenciais.

Quando a intensidade de aplicação do emissor é maior que a taxa de infiltração de água do solo, a carga de pressão ao redor do emissor torna-se positiva. A consequência disso é gerar uma contrapressão que reduz o gradiente hidráulico entre o interior do emissor e o solo, consequentemente reduzindo a vazão do emissor. Em solos de textura fina, o efeito da contrapressão é mais pronunciado, resultando em uma maior redução na vazão do emissor (Nogueira et al., 2021).

Com a análise dos componentes principais e de agrupamento, é possível verificar que, de maneira geral, o GS se distanciou das demais profundidades do GSS. Com base na análise de agrupamento, apenas a profundidade de instalação de 5 cm esteve no mesmo grupo que o GSS para as variáveis de emergência e fisiológicas. No entanto, para a análise de agrupamento considerando todas as variáveis, foram formados três grupos, os quais foram compostos pelo GS, as profundidades intermediárias (5, 10 e 15) e as maiores profundidades de instalação dos gotejadores (20, 25 e 30 cm).

Uma decisão importante no uso do GSS deve se referir à profundidade da instalação do gotejador. A profundidade desejável de instalação varia de acordo com a cultura, tipo de solo, fonte de água, clima, práticas culturais e preferências do projetista de irrigação. As características de enraizamento da cultura e a redistribuição da água do solo devem ser os fatores mais importantes na escolha da profundidade de instalação (Lamm; Camp, 2007).

5 CONCLUSÕES

A emergência das plantas de feijão-caupi é comprometida com o aumento da profundidade de instalação dos gotejadores, não sendo afetada pelas diferentes vazões dos emissores.

O aumento da profundidade dos gotejadores em solo argiloso influenciou negativamente as variáveis de produção, fisiológicas e o desenvolvimento das raízes do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário.

As respostas do feijão-caupi para o gotejamento superficial foram mais promissoras para as condições do presente estudo em comparação com o gotejamento subsuperficial.

As respostas produtivas, fisiológicas e da morfologia das raízes do feijão-caupi não foram conclusivas para as duas vazões estudadas. De uma maneira geral, uma leve vantagem foi observada para a vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ em comparação com a vazão de $3,8 \text{ L h}^{-1}$. Entretanto, mais estudos são necessários para investigar o efeito das diferentes vazões em sistemas de gotejamento subsuperficial.

REFERÊNCIAS

- Araújo, E.D., Santos, S.R., Alves, P.F.S., Kondo, M.K., Carvalho, A.J., Feitosa, F.M., 2020. Agronomic performance of common bean crops fertigated with treated sewage and mineral fertilizer. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 24, 520-527. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n8p520-527>
- Barrs, H.D., Weatherley, P.E., 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*. 15, 413-428. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>
- Bernardo, S., Mantovani, E.C., Silva, D.D., Soares, A.A., 2019. Manual de irrigação. 9 ed. Editora UFV, Viçosa. 545p.
- Bhattarai, S.P., Midmore, D.J., Pendergast, L., 2008. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygenation treatments in vertisols. *Irrigation Science*. 26, 439-450. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0112-5>
- Bozkurt, S., Mansuroglu, G.S., 2018. Responses of unheated greenhouse grown green bean to buried drip tape placement depth and watering levels. *Agricultural Water Management*. 197, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.11.009>
- Brasil, 2009. Regras para análise de sementes. MAPA/ACS, Brasília. 395p.
- Burridge, J., Jochua, C.N., Bucksch, A., Lynch, J.P., 2016. Legume shovelomics: High-throughput phenotyping of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* subsp. *unguiculata*) root architecture in the field. *Field Crops Research*. 192, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.008>
- Carvalho, M., Castro, I., Moutinho-Pereira, J., Correia, C., Egea-Cortines, M., Matos, M., Rosa, E., Carnide, V., Lino-Neto, T., 2019. Evaluating stress responses in cowpea under drought stress. *Journal of Plant Physiology*, 241, 153001. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.153001>
- Elaiuy, M.L.C., Santos, L.N.S., Souza, A.C.M., Souza, C.F., Matsura, E.E., 2015. Wet bulbs from the subsurface drip irrigation with water supply and treated sewage effluent. *Engenharia Agrícola*. 35, 242-253. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n2p242-253/2015>
- FAO, 2020a. Water scarcity. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/water/water-scarcity/en/>> Acesso em: 01/03/2021.
- FAO, 2020b. The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9692en>

- Farooq, M., Rehman, A., Al-Alawi, A.K.M., Al-Busaidi, W.M., Lee, D.J., 2020. Integrated use of seed priming and biochar improves salt tolerance in cowpea. *Scientia Horticulturae*. 272, 109507. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109507>
- Ferraz, R.L.S., Melo, A.S., Suassuna, J.F., Brito, M.E.B., Fernandes, P.D., Nunes Júnior, E.S., 2012. Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 42, 181-188. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632012000200010>
- Freitas, R.M.O., Dombroski, J.L.D., Freitas, F.C.L., Nogueira, N.W., Pinto, J.R.S., 2017. Physiological responses of cowpea under water stress and rewatering in no-tillage and conventional tillage systems. *Caatinga*. 30, 559-567. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n303rc>
- Lamm, F.R., Camp, C.R., 2007. Subsurface drip irrigation. *Developments in Agricultural Engineering*. 13, 473-551. [https://doi.org/10.1016/S0167-4137\(07\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4137(07)80016-3)
- Liu, Y., Hu, C., Li, B., Ding, D., Zhao, Z., Fan, T., Li, Z., 2021. Subsurface drip irrigation reduces cadmium accumulation of pepper (*Capsicum annuum* L.) plants in upland soil. *Science of The Total Environment*. 755, 142650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142650>
- Ma, X., Sanguinet, K.A., Jacoby, P.W., 2020. Direct root-zone irrigation outperforms surface drip irrigation for grape yield and crop water use efficiency while restricting root growth. *Agricultural Water Management*. 231, 105993. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105993>
- Maguire, J.D., 1962. Speed of germination - Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*. 2, 176-177. <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- Martínez-Gimeno, M.A., Bonet, L., Provenzano, G., Badal, E., Intrigliolo, D.S., Ballester, C., 2018. Assessment of yield and water productivity of clementine trees under surface and subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 206, 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.011>
- Matos, A.T., Matos, M.P., 2017. Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. Editora UFV, Viçosa. 371p.
- Matoso, A.O., Soratto, R.P., Ceccon, G., Figueiredo, P.G., Luiz Neto Neto, A., 2013. Desempenho agronômico de feijão-caupi e milho semeados em faixas na safrinha. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 48, 722-730. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000700004>
- Melo, F. B., Cardoso, M.J., Salviano, A.A.C., 2005. Fertilidade do solo e adubação. In: Freire Filho, F.R., Lima, J.A.A., Ribeiro, V.Q. (Eds.), *Feijão-caupi: Avanços tecnológicos*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, p. 229-242.
- Nazari, E., Besharat, S., Zeinalzadeh, K., Mohammadi, A., 2021. Measurement and simulation of the water flow and root uptake in soil under subsurface drip irrigation

- of apple tree. *Agricultural Water Management*. 255, 106972. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106972>
- Nogueira, V.H.B., Diotto, A.V., Thebaldi, M.S., Colombo, A., Silva, Y.F., Lima, E.M.C., Resende, G.F.L., 2021. Variation in the flow rate of drip emitters in a subsurface irrigation system for different soil types. *Agricultural Water Management*. 243, 106485. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106485>
- Nopens, I., Capalozza, C., Vanrolleghem, P.A., 2001. Stability analysis of a synthetic municipal wastewater. *Universiteit Gent, Gent*. 22p.
- Pereira Filho, J.V., Lima Bezerra, F.M., Silva, T.C., Pereira, C.C.M.S., 2017. Crescimento vegetativo do feijão-caupi cultivado sob salinidade e déficit hídrico. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*. 11, 2217-2228. <https://doi.org/10.7127/rbai.v11n800718>
- Ribeiro, A.C., Guimarães, P.T.G., Alvarez, V.H., 1999. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Editora SBCS, Viçosa. 359p.
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Lumbrreras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A., Araujo Filho, J.C., Oliveira, J.B., Cunha, T.J.F., 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5 ed. Embrapa, Brasília. 356p.
- Santos, L.N.S., Matsura, E.E., Gonçalves, I.Z., Barbosa, E.A.A., Nazário, A.A., Tuta, N.F., Elaiuy, M.C.L., Feitosa, D.R.C., Sousa, A.C.M., 2016. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agricultural Water Management*. 170, 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.025>
- Selim, E.M., Mosa, A.A., El-Ghamry, A.M., 2009. Evaluation of humic substances fertigation through surface and subsurface drip irrigation systems on potato grown under Egyptian sandy soil conditions. *Agricultural Water Management*. 96, 1218-1222. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.018>
- Silva, F.G., Dutra, W.F., Dutra, A.F., Oliveira, I.M., Filgueiras, L., Melo, A.S., 2015. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 19, 946-952. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p946-952>
- Silva, G.H., Cunha, F.F., Morais, C.V., Freitas, A.R.J., Silva, D.J.H., Souza, C.M., 2020. Mulching materials and wetted soil percentages on zucchini cultivation. *Ciência e Agrotecnologia*. 44, e006720. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202044006720>
- Souza, C.F., Folegatti, M.V., Matsura, E.E., Or, D., 2006. Calibração da reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo. *Engenharia Agrícola*. 26, 282-291. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100030>
- Souza, J.A.R., Moreira, D.A., Salomão, L.C., Cunha, F.F., Pedroso, R.S., Silva, E.L., Gonçalves, J.M., Rezende, J.G.F., Costa, J.V.C., Silva Filho, J.F., 2018. Wet bulb

dimensions associated with different flow and terrain declivity. *African Journal of Agricultural Research*. 13, 425-431. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9941>

Vásquez, M.A.N., Pinheiro, A.G., Oliveira Filho, J.N., 2017. Dinâmica do bulbo úmido em irrigação por gotejamento subsuperficial. *Engenharia na Agricultura*. 25, 148-156. <https://doi.org/10.13083/reveng.v25i2.768>

Wu, D., Xu, X., Chen, Y., Shao, H., Sokolowski, E., Mi, G., 2019. Effect of different drip fertigation methods on maize yield, nutrient and water productivity in two-soils in Northeast China. *Agricultural Water Management*. 213, 200-211. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.018>

CAPÍTULO 3: IMPACTOS NO SOLO E EM PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI FERTIRRIGADAS COM ESGOTO SANITÁRIO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL

RESUMO: Os problemas atuais de disponibilidade de água e produção de alimentos podem ser mitigados com a aplicação de esgoto sanitário e uso de sistemas por gotejamento subsuperficial na agricultura irrigada. Mas antes, estudos devem ser realizados para avaliar os impactos provenientes da associação dessas técnicas no solo e na planta. Assim, objetivou-se avaliar as mudanças químicas do solo e no desenvolvimento do feijão-caupi recebendo esgoto sanitário por gotejadores operando com diferentes vazões e instalados em distintas profundidades. Os gotejadores foram instalados nas profundidades de 0 (gotejamento superficial), 5, 10, 15, 20, 25 e 30 cm e operaram com as vazões de 1,6 e 3,8 L h⁻¹. O feijão-caupi foi cultivado em vasos de 65 L preenchidos com solo argiloso e mantidos em casa de vegetação. Utilizou-se esgoto sanitário sintético e a quantidade aplicada nos vasos foi baseada no limite máximo de adubação nitrogenada do feijão-caupi. O manejo da irrigação foi realizado por meio da umidade atual do solo, utilizando sondas de Time Domain Reflectometry (TDR). O aumento da profundidade de instalação dos gotejadores influenciou negativamente a produção de grãos e o desenvolvimento vegetativo do feijão-caupi. A fertirrigação com esgoto sanitário sintético em profundidade incrementou a concentração de P e a saturação por bases do solo. O aumento da profundidade de instalação dos gotejadores proporcionou acréscimos nas concentrações de P, K, Ca e Mg no solo. A concentração de sódio no solo é menor para as maiores profundidades de instalação dos gotejadores. Conclui-se que as vazões dos gotejadores não afetam os parâmetros químicos do solo e as características agronômicas do feijão-caupi. Apesar de disponibilizar nutrientes em profundidade, o sistema de gotejamento subsuperficial não se mostrou apropriado para a produção do feijão-caupi cultivado em solo argiloso.

Palavras-chave: *Vigna unguiculata*, fertilidade, irrigação localizada, química do solo.

CHAPTER 3: FERTIRRIGATION OF COWPEA WITH MUNICIPAL WASTEWATER BY SUBSURFICIAL DRIP AND THE IMPACTS ON THE SOIL AND PLANT

ABSTRACT: The current problems of water availability and food production can be mitigated with the application of municipal wastewater (MWW) and the use of subsurface drip systems in irrigated agriculture. But first, studies must be carried out to assess the impacts arising from the association of these techniques on soil and plant. Thus, the objective was to evaluate the chemical changes in the soil and the development of cowpea beans receiving municipal wastewater through drippers operating at different flow rates and installed at different depths. The drippers were installed at depths of 0 (surface drip), 5, 10, 15, 20, 25, and 30 cm and operated with flows of 1.6 and 3.8 L h⁻¹. Cowpea was cultivated in 65 L pots filled with clayey soil and kept in a greenhouse. Synthetic MWW was used and the amount applied in the pots was based on the maximum limit of nitrogen fertilization of the cowpea. Irrigation management was carried out using the current soil moisture, using Time Domain Reflectometry (TDR) probes. The increase in the installation depth of the drippers negatively influenced the grain production and the vegetative development of the cowpea. Deep fertigation with synthetic MWW increased P concentration and soil base saturation. The increase in the installation depth of the drippers provided increases in the concentrations of P, K, Ca, and Mg in the soil. Sodium concentration in the soil is lower for the greater depths of installation of the drippers. It is concluded that the flow rates of the drippers do not affect the chemical parameters of the soil and the agronomic characteristics of the cowpea. Despite providing nutrients in-depth, the subsurface drip system was not suitable for the production of cowpea cultivated in clayey soil.

Keywords: *Vigna unguiculata*, fertility, localized irrigation, soil chemistry.

1. INTRODUÇÃO

A crescente escassez de água para irrigação se tornou uma questão fundamental em escala global, principalmente em regiões áridas e semiáridas. As Nações Unidas previram que a demanda global por alimentos aumentará 70% e o consumo de água agrícola aumentará 19% até 2050 (Shah et al., 2018). Portanto, é fundamental economizar água para a agricultura com o objetivo de garantir a segurança alimentar.

A disposição de esgoto sanitário na agricultura é uma forma sustentável de disponibilizar água e nutrientes para as plantas e reciclar nutrientes no solo (Araújo et al., 2020). No entanto, essa disposição de esgoto sanitário no solo deve ser criteriosa, pois a aplicação sem controle pode provocar salinização do solo, dispersão de argilas (Alves et al., 2019), contaminação das plantas, homem e ambiente, principalmente se aplicado via métodos de irrigação por aspersão.

Os métodos de irrigação por aspersão geralmente aumentam o rendimento das culturas ao aplicar grandes quantidades de água e fertilizantes, no entanto, não promovem a economia de água e a preservação do ambiente ecológico do solo. Entretanto, a economia de água e fertilizantes é um ponto primordial para o desenvolvimento agrícola. Nesse contexto o gotejamento superficial (GS) e a irrigação por gotejamento subsuperficial (GSS) são alternativas mais eficazes. Os sistemas de GS e GSS são englobados pelo método de irrigação localizada. Esses sistemas aplicam uniformemente a água diretamente na zona da raiz das plantas por meio de emissores e em intervalos frequentes (Soliman et al., 2020). Com estes sistemas é possível disponibilizar água e nutrientes próximo ao sistema radicular das plantas, proporcionando economia de água e aumento dos rendimentos das culturas (Çolak et al., 2017).

Além disso, o GS e GSS facilitam o uso de água de menor qualidade (Palacios-Díaz et al., 2009), pois esses sistemas apresentam alta eficiência de irrigação, minimizando as perdas de água por deriva. Essa característica é fundamental para a disposição de esgoto sanitário na agricultura, pois reduz dispersão de patógenos, odores e contato animal e humano. As vantagens relacionadas ao cultivo e às práticas culturais incluem: aumento do crescimento, rendimento e qualidade da produção

devido a maior frequência de irrigação e deposição de nutrientes de pouca mobilidade próximo à zona radicular (Wang et al., 2017).

Um aspecto importante a ser considerando nesses sistemas de irrigação é a profundidade de instalação do gotejador, pois, se instalado de maneira equivocada pode afetar o transporte e a distribuição da umidade no solo (Bhattarai et al., 2008). De uma maneira geral, os nutrientes do solo e as raízes das principais culturas são distribuídos, principalmente, na camada de 0-20 cm do solo. Portanto, a falta de água nesta profundidade pode afetar a mineralização e a disponibilidade de nutrientes no solo (Lamm, 2014), especialmente para o fósforo (P) e o potássio (K), cujos movimentos no solo ocorrem principalmente por difusão (Wu et al., 2019). Diante disso, mudanças na dinâmica da umidade do solo, da temperatura, do pH, e nutrientes, são indicadores eficazes da qualidade do solo (Wang et al., 2018).

Considerando a importância da disposição segura de esgoto sanitário via gotejamento, é interessante associar seu estudo com culturas de importância econômica e social, como por exemplo, o feijão-caupi, produzido principalmente na região Nordeste do Brasil. Esse grão constitui uma das principais fontes de proteína vegetal, desempenhando um importante papel na alimentação humana e na geração de emprego e renda. Atualmente, devido aos problemas de oferta e demanda agravado pela pandemia do Covid-19, o custo do feijão-caupi encontra-se no valor de comercialização de 235,00 R\$/Sc (IBRAFE, 2021). Além disso, o feijão-caupi é uma cultura de ciclo curto e possui baixas exigências hídrica e de fertilidade do solo (Farooq et al., 2020), constituindo uma alternativa adequada para áreas com disposição de esgoto sanitário.

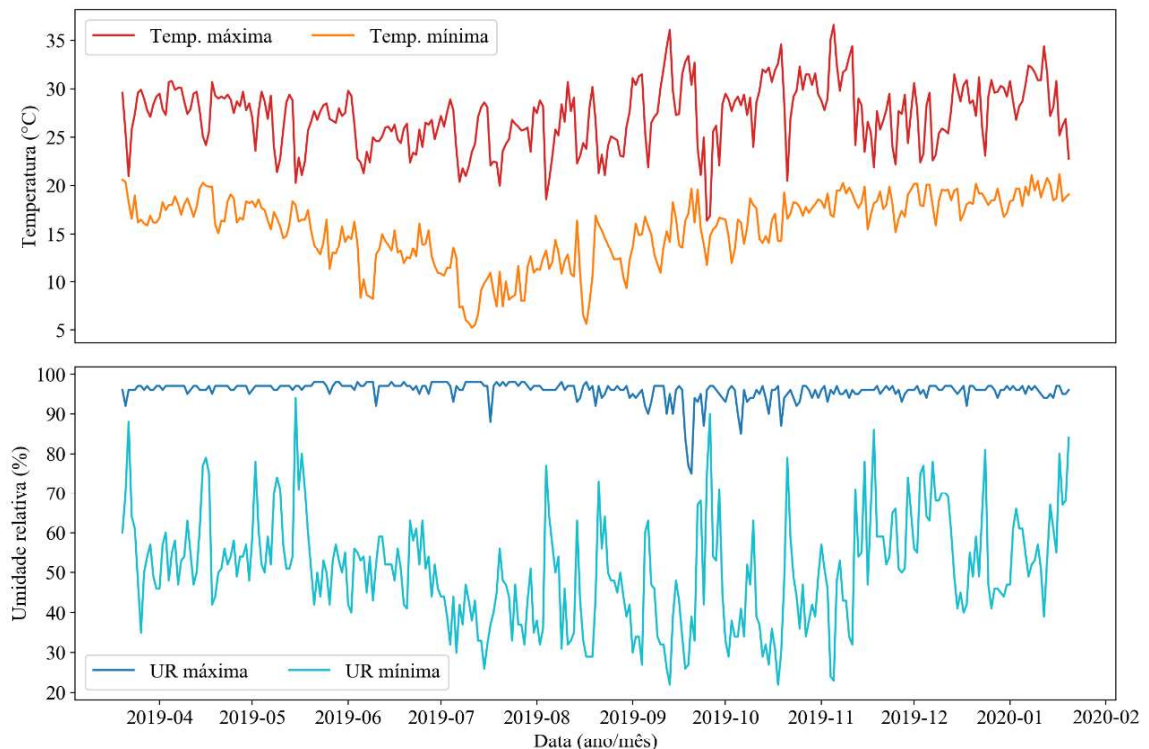
Diante dos problemas atuais de disponibilidade de água versus produção de alimento, torna-se imprescindível o estudo de técnicas alternativas e mais sustentáveis de produção agrícola, como a disposição de esgoto sanitário por meio do gotejamento instalado em diferentes profundidades no cultivo do feijão-caupi. Dessa forma, objetivou-se no presente estudo avaliar as mudanças químicas do solo e no desenvolvimento do feijão-caupi, cultivar BRS Tumucumaque, fertirrigado com esgoto sanitário sintético por gotejadores de diferentes vazões e instalados em diferentes profundidades.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Condições locais do experimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação instalada no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), situado no município de Viçosa-MG. As coordenadas geográficas são: 20°46'18,97" S, 42°52'28,19" W, Datum WGS-84, possuindo altitude de 651 m acima do nível do mar. O período do trabalho foi de agosto de 2019 a fevereiro de 2020. Na Figura 1 são apresentadas as variações dos elementos meteorológicos ocorridos no interior da casa de vegetação durante o período experimental.

Figura 1 - Condições ambientais durante a condução dos experimentos



2.2 Tratamentos e delineamento experimental

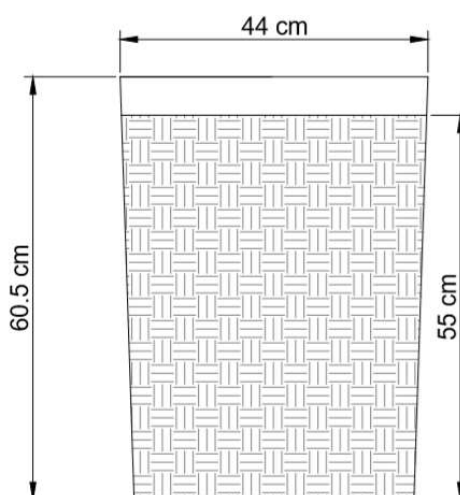
O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com três repetições e os tratamentos arranjados em esquema de parcelas subdivididas. As parcelas

principais consistiram em emissores com diferentes vazões e as subparcelas foram compostas pelas profundidades de instalação dos tubos gotejadores.

As parcelas experimentais consistiram em emissores operando com vazões de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ e $3,8 \text{ L h}^{-1}$. As subparcelas foram compostas pelas seguintes profundidades de instalação dos gotejadores: 0 (gotejamento superficial), 5, 10, 15, 20, 25 e 30 cm (gotejamento subsuperficial). Os gotejadores utilizados foram do modelo AmnonDrip PC AS (autocompensante e antisifão) da marca NaanDanJain®. Procedeu-se a avaliação do sistema de irrigação antes do início dos experimentos, encontrou-se um coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) de 100% para as duas vazões utilizadas (Bernardo et al., 2019).

As unidades experimentais foram compostas por vasos cultivados com feijão-caupi da cultivar BRS Tumucumaque, semeados com sementes comerciais não certificadas de primeira geração (S1). Os vasos possuíam volumes de 65 L, com altura de 60,5 cm e diâmetros inferior e superior de 30 e 44 cm, respectivamente (Figura 2). Os vasos foram preenchidos com solo até a altura de 55 cm, deixando assim uma borda de 5,5 cm. O volume útil de solo foi de 58,9 L e a área útil a nível do solo foi de $0,1434 \text{ m}^2$.

Figura 2 - Croqui das unidades experimentais



2.3 Condução do experimento

O solo utilizado nos experimentos foi coletado na Área Experimental de Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade

Federal de Viçosa (UFV). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Santos et al., 2018), e as características químicas e físico-hídricas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos químicos e físico-hídricos do solo antes da implantação dos experimentos

pH H ₂ O	¹ MO dag kg ⁻¹	² P mg dm ⁻³	² K mg dm ⁻³	³ Ca	³ Mg	⁴ SB cmol _c dm ⁻³	⁵ t	⁶ T	⁷ H+Al
5,8	1,88	4,6	20,0	1,01	0,50	1,56	1,56	4,20	2,64
⁸ S	² Cu	² Fe	² Mn	² Zn			⁹ Prem mg L ⁻¹		¹⁰ V %
25,3	3,0	68,2	33,1	4,7			21,6		37,1
¹¹ CC m ³ m ⁻³	¹² PMP m ³ m ⁻³		¹³ Ds g cm ⁻³	Areia	Silte	Argila	Classificação Textural		
0,376	0,254		1,17	52	12	36	Argiloso		

¹Matéria orgânica, determinada por colorimetria; ²Extrator: Mehlich⁻¹; ³Extrator: KCl 1 M; ⁴SB - Soma de bases; ⁵CTC efetiva; ⁶T: CTC a pH 7; ⁷Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ - pH 7,0; ⁸Extrator - Fosfato monocálcico em ácido acético; ⁹Fósforo remanescente, determinado em solução equilíbrio de P; ¹⁰V - Saturação por bases; ¹¹Capacidade de campo, ¹²Ponto de murcha permanente e ¹³Densidade do solo.

O solo coletado foi peneirado em tela de 1” para evitar materiais grosseiros dentro dos vasos, e com isso, minimizar o surgimento de caminhos preferenciais. Colocaram-se as mangueiras dentro dos vasos e preencheu-os com solo sem modificar a profundidade de instalação dos gotejadores. Por fim, antes de realizar o experimento com a disposição de ES, em diferentes profundidades de gotejo, realizaram-se outros testes de irrigação com cinco meses de antecedência ao início do experimento, o que permitiu uma reestruturação do solo a ser estudado.

Para simular o ES, utilizou-se uma solução de origem sintética (Nopens et al., 2001). Para preparo desta solução, sais e ingredientes foram diluídos em água de abastecimento. Os compostos utilizados para o preparo do esgoto sanitário sintético (ESS) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição teórica e respectivas concentrações para a produção de 1 litro de esgoto sanitário sintético. Fonte: Adaptado (Nopens et al., 2001)

Sais	Quant. ¹	DQO	mg L ⁻¹		
			N	P	K
Ureia	92	23	43	0	0
MAP	13	0	1	3	0
Acetato de sódio*	132	79	0	0	0
Peptona	17	17	1	0	0
MgSO ₄	20	0	0	0	0
KH ₂ PO ₄	23	0	0	5	7
KCl	25	0	0	0	13
FeSO ₄ .7H ₂ O	5,8	0	0	0	0
Ingredientes					
Amido	122	122	0	0	0
Leite em pó	116	116	7	1	0
Fermento	52	52	6	0	0
Óleo de soja	29	29	0	0	0
Total		438	58	9	20

¹Quantidade em massa de sais e ingredientes para produção de 1 L de esgoto sanitário sintético; *Acetato de sódio hidratado. ² Demanda Química de Oxigênio.

A adubação do feijão-caupi foi calculada com base nos resultados da análise química do solo (Tabela 1). Inicialmente foi realizado a calagem do solo com uma dose de 100 g m⁻³ de calcário, equivalente à 320 kg ha⁻¹ (Ribeiro et al., 1999). A correção da fertilidade do solo seguiu as recomendações de Melo et al. (2005) para atender a demanda nutricional do feijão-caupi de 6,7 g m⁻³ de N (20 kg ha⁻¹), 20 g m⁻³ de P₂O₅ (60 kg ha⁻¹) e 13,3 g m⁻³ de K₂O (40 kg ha⁻¹). Todo o nitrogênio e parte do potássio e fósforo foram aplicados via ESS, considerando o nitrogênio como elemento limitante (Matos e Matos, 2017). O restante do fósforo e potássio foram aplicados na semeadura do feijão-caupi (Tabela 3) na forma de superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente.

A semeadura foi realizada no dia 26 de agosto de 2019, depositando seis sementes de feijão-caupi por vaso na profundidade de três centímetros. Posteriormente, foram mantidas apenas duas plantas por vaso. As aplicações de ESS foram iniciadas aos 24 dias após a semeadura, realizando-se uma aplicação a cada 4 dias, totalizando 7 aplicações de ESS ou 8,26 L de ESS por vaso (Tabela 3).

Tabela 3 - Volume total de esgoto sanitário sintético (ESS) aplicado em cada unidade experimental e nutrientes aportados pelo ESS e adubação mineral

¹ Vol. de ESS (L)	-----N (kg ha ⁻¹)-----			-----P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)-----			-----K ₂ O (kg ha ⁻¹)-----		
	ESS	Semeio	Total	ESS	Semeio	Total	ESS	Semeio	Total
8,26	20	0	20	13,56	46,44	60	15,85	24,15	40

¹Volume de esgoto sanitário sintético aplicado em todo o experimento.

O manejo da irrigação foi realizado por meio do balanço hídrico do solo. Diariamente efetuava-se o monitoramento da umidade inserindo sondas do tipo reflectometria no domínio do tempo (TDR) nas laterais dos vasos em cinco profundidades (7,5; 15; 22,5; 30; 37,5 cm) (Souza et al., 2006). O tratamento com sistema de gotejamento superficial foi usado como padrão para calcular a demanda hídrica para os demais tratamentos, padronizando assim o volume de água aplicado em todas as parcelas. Todo o volume de ESS aplicado, calculado pelo elemento limitante, foi insuficiente para atender a demanda hídrica de todo o ciclo de cultivo do feijão-caupi. Dessa forma, houve complementação com água de boa qualidade para reposição daquela água perdida por evapotranspiração nos vasos.

2.4 Avaliações experimentais

2.4.1 Componentes produtivos e emissões de CO₂ e água

As avaliações de emissão de CO₂ e fluxo de vapor de água foram realizadas quando todos os tratamentos estavam na fase reprodutiva, com o auxílio de um analisador de gases de infravermelho (Infrared Gas Analyzer - IRGA, marca ADC BioScientific Ltd, modelo LC-Pro+). As medições foram realizadas diretamente no solo com o auxílio de um cilindro metálico inserido no perfil do solo, sob condições naturais de temperatura e concentração de CO₂ do ar. A temperatura do solo foi medida com um termômetro digital de infravermelho.

Determinou-se para cada unidade experimental a produção de grãos por planta corrigida para 13% de umidade. Após o final do ciclo produtivo, realizou-se a coleta das plantas de feijão-caupi e retirou-se as folhas e pecíolos. Esse procedimento foi realizado pelo motivo de alguns tratamentos estarem mais desenvolvidos e já terem perdido parte das folhas (senescência). Em seguida, os caules foram colocados para secar em estufa a temperatura de 70±3 °C, até a obtenção da massa seca do caule

por planta (MS caule). No mesmo período, a parte aérea das plantas daninhas foram removidas de cada tratamento e determinou-se também a massa seca (MS PD).

2.4.2 Análises químicas do solo

Ao final do experimento, dividiu-se o solo de cada tratamento em 5 camadas, 0-10; 10-20; 20-30; 30-40 e 40-55 cm. Para cada camada retirou-se uma amostra de solo e procedeu-se a análise química. Um resumo das variáveis analisadas e seus respectivos métodos de quantificação são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis químicas do solo analisadas e seus respectivos métodos de quantificação

Variável analisada	Método
Fósforo (P)	Extrator Mehlich-1
Potássio (K)	Extrator Mehlich-1
Sódio (Na)	Extrator Mehlich-1
Cálcio (Ca)	Extrator: KCl - 1 mol L ⁻¹
Magnésio (Mg)	Extrator: KCl - 1 mol L ⁻¹
Índice de saturação por sódio (ISNa)	ISNa = Na/T *100
pH	Em água, KCl e CaCl - Relação 1:2,5
Acidez potencial (H+Al)	Extrator Acetato de Ca 0,5 mol L ⁻¹ - pH 7,0
Índice de saturação por base (V)	$V = (K+Na+Ca+Mg)/T*100$

T = CTC potencial; P, K, Na em mg dm⁻³; Ca, Mg e H+Al em cmol_c dm⁻³; ISNa e V em %.

2.5 Análises estatísticas

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância e, quando o teste F foi significativo a 5% de probabilidade, realizou-se a análise de regressão para o fator profundidade de instalação dos gotejadores. A escolha dos modelos de regressão foi feita com base na significância dos parâmetros da regressão, verificada pelo teste t a 5% de probabilidade, e pela capacidade do modelo em explicar o comportamento da variável estudada. A fim de realizar uma análise integrada das diversas variáveis mensuradas, empregaram-se duas análises multivariadas, a análise de componentes principais (ACP) e a análise de agrupamento k-means. A escolha do número de grupos do k-means foi realizada com base no coeficiente de Silhouette (Kodinariya e Makwana, 2013) e no comportamento dos tratamentos na

ACP. A análise k-means foi realizada com todas as variáveis em estudo e a medida de distância utilizada foi a Euclidiana.

3. RESULTADOS

3.1 Componentes produtivos e emissões de CO₂ e água

As variáveis fluxo de vapor de água (WFlux), temperatura da superfície do solo (T solo), produção de grãos por planta (Prod.), matéria seca do caule por planta (MS caule) do feijão-caupi e matéria seca das plantas daninhas (MS PD) foram influenciadas significativamente pelas profundidades de instalação dos gotejadores (Tabela 5). No entanto, a emissão de CO₂ do solo não foi influenciada pela profundidade de instalação dos gotejadores e nenhuma das variáveis mencionadas foram influenciadas pelas vazões estudadas (Tabela 5).

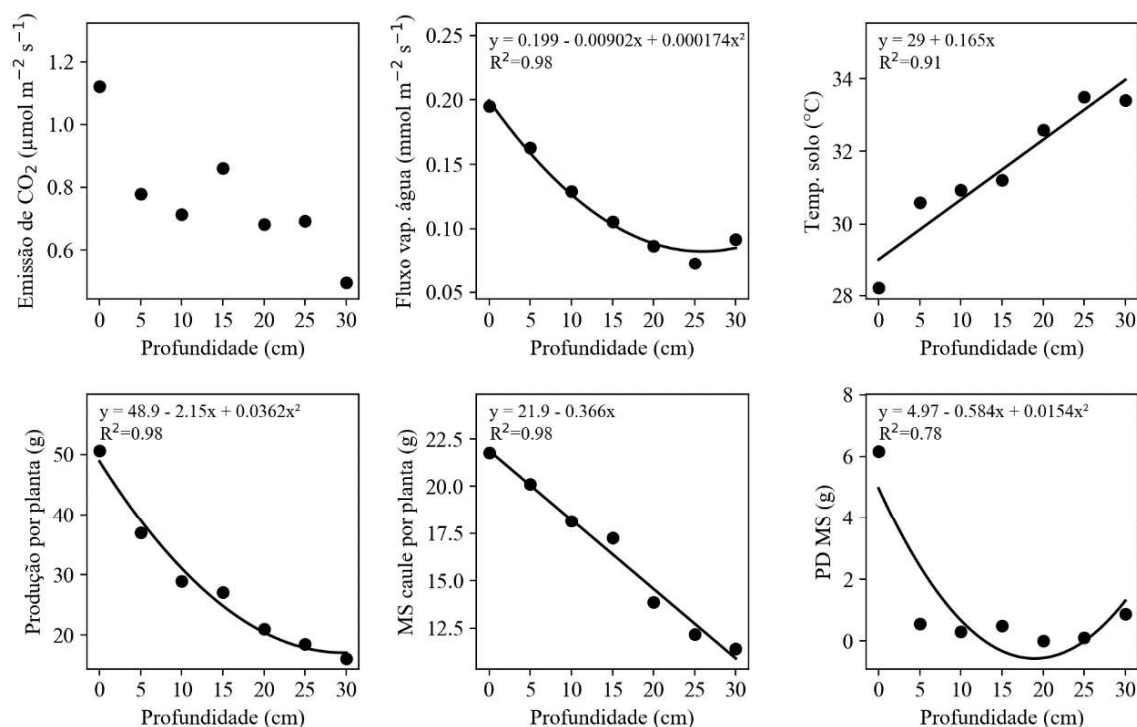
Tabela 5 - Resumo da análise de variância da emissão de CO₂ (NCER), fluxo de vapor de água (WFlux) e temperatura da superfície do solo (T solo), produção de grãos por planta (Prod.), matéria seca do caule por planta (MS caule) do feijão-caupi e matéria seca das plantas daninhas (MS PD) dos tratamentos fertirrigados com esgoto sanitário sintético aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões (Q) e profundidades de instalação (Prof.)

Variáveis	Fonte de variação			
	Q	Prof.	Q * Prof.	CV (%)
NCER	3,30E-1 ^{ns}	2,25E-1 ^{ns}	1,06E-1 ^{ns}	42,33
WFlux	2,58E-3 ^{ns}	1,19E-2 ^{***}	5,55E-4 ^{ns}	29,05
T solo	2,54E-1 ^{ns}	2,09E+1 ^{***}	2,59E+0 ^{ns}	5,25
Prod.	1,53E+1 ^{ns}	8,73E+2 ^{***}	2,31E+1 ^{ns}	15,37
MS caule	8,70E-2 ^{ns}	9,56E+1 ^{***}	3,30E+0 ^{ns}	17,87
MS PD	1,06E+1 ^{ns}	2,92E+1 [*]	9,76E+0 ^{ns}	251,51

Quadrados médios seguidos de ^{***}, ^{**} e ^{*} são significativos a 0,1, 1 e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo pelo teste F.

O fluxo de vapor de água, a produção de grãos do feijão-caupi e a matéria seca das plantas daninhas decresceram em função do aumento da profundidade de instalação dos gotejadores, ajustando assim modelos quadráticos para explicar o comportamento dessas variáveis. A matéria seca do caule do feijão-caupi decresceu linearmente e a temperatura da superfície do solo aumentou linearmente em função do incremento da profundidade de instalação dos gotejadores (Figura 3).

Figura 3 - Emissão de CO₂, fluxo de vapor de água e temperatura da superfície do solo, produção de grãos por planta, matéria seca do caule por planta (MS caule) do feijão-caupi e matéria seca das plantas daninhas (MS PD) dos tratamentos fertirrigados com esgoto sanitário sintético aplicado por gotejadores instalados em diferentes profundidades



O fluxo de vapor de água foi de 0,199 mmol m⁻² s⁻¹ para o gotejamento superficial (GS) e reduziu 20,5% e 57,3% para as profundidades de instalação dos gotejadores de 5 e 30 cm, respectivamente. Em consequência disso, a temperatura da superfície do solo foi menor para o tratamento com GS, sendo de 29 °C (Figura 3).

A irrigação e fertirrigação com esgoto sanitário sintético (ESS) por gotejamento superficial (GS) propiciou uma produção de grãos por planta de 48,90 g. Para a instalação do gotejador a 5 e 30 cm de profundidade, a produção de grãos reduziu 18,6% e 56,1% em relação ao GS, respectivamente. A matéria seca do caule do feijão-caupi foi de 21,90 g por planta para o tratamento com o GS, e reduziu 8,4% para a profundidade de 5 cm e 50,1% para a profundidade de 30 cm (Figura 3).

O GS favoreceu o desenvolvimento de plantas daninhas, resultando em 4,97 g de matéria seca de plantas daninhas por parcela experimental. Já na profundidade de instalação do gotejador a 5 cm houve uma redução de 51% no desenvolvimento de plantas daninhas (Figura 3).

3.2 Fósforo, potássio e sódio

A variável concentração de sódio na camada 1 do solo (Na C1) aportado via fertirrigação com o ESS foi influenciada significativamente pela interação das diferentes vazões e profundidades de instalação dos gotejadores. Nos tratamentos com os gotejadores instalados a 5 cm, o Na C1 foi maior para a vazão de 1,6 L h⁻¹ em comparação com a vazão de 3,8 L h⁻¹. No entanto, para o gotejador a 15 cm de profundidade, a concentração do Na C1 foi maior para a vazão de 3,8 L h⁻¹ (Tabela 6).

Tabela 6 - Resumo da análise de variância do fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na) em diferentes camadas do solo, C1 0-10; C2 10-20; C3 20-30; C4 30-40; C5 40-55 cm, e comparação de média do sódio e potássio aportados via fertirrigação com esgoto sanitário sintético aplicado por gotejadores com diferentes vazões (Q) e profundidades de instalação (Prof.)

Variáveis	Fonte de variação			
	Q	Prof.	Q * Prof.	CV (%)
P C1	7,28E+2 ^{ns}	1,09E+2*	3,32E+2 ^{ns}	26,06
P C2	9,45E-1 ^{ns}	3,21E+0 ^{ns}	2,73E+0 ^{ns}	27,15
P C3	8,60E-2 ^{ns}	4,52E-1 ^{ns}	1,43E-1 ^{ns}	15,59
P C4	4,61E-1 ^{ns}	3,11E-1**	7,60E-2 ^{ns}	9,70
P C5	5,71E-1 ^{ns}	1,90E-1 ^{ns}	2,89E-2 ^{ns}	12,60
K C1	7,46E+2 ^{ns}	2,77E+3***	1,01E+2 ^{ns}	18,78
K C2	1,84E+2 ^{ns}	4,21E+2*	1,36E+2 ^{ns}	52,85
K C3	8,86E+1*	7,40E+1***	1,63E+1 ^{ns}	31,19
K C4	1,34E+2*	4,60E+1**	9,21E+0 ^{ns}	31,10
K C5	9,15E+1**	3,92E+1**	4,97E+0 ^{ns}	34,38
Na C1	9,47E+0 ^{ns}	6,22E+1***	1,47E+1*	21,33
Na C2	8,98E-1 ^{ns}	3,69E+1***	4,82E+0 ^{ns}	81,92
Na C3	1,79E+0 ^{ns}	4,27E+1***	1,67E+0 ^{ns}	35,54
Na C4	8,95E-1 ^{ns}	2,16E+1***	1,68E+0 ^{ns}	28,73
Na C5	1,10E-1 ^{ns}	1,23E+1 ^{ns}	6,53E-1 ^{ns}	28,26

Variáveis	Vazão (L h ⁻¹)	Profundidade do gotejador (cm)						
		0	5	10	15	20	25	30
Na C1	1,6	15,58 a	15,58 a	9,64 a	6,91 b	7,58 a	8,31 a	7,57 a
	3,8	17,50 a	11,04 b	11,04 a	13,03 a	8,41 a	9,07 a	7,73 a
				K C3	K C4	K C5		
	1,6			10,19 b	9,05 b	7,62 b		

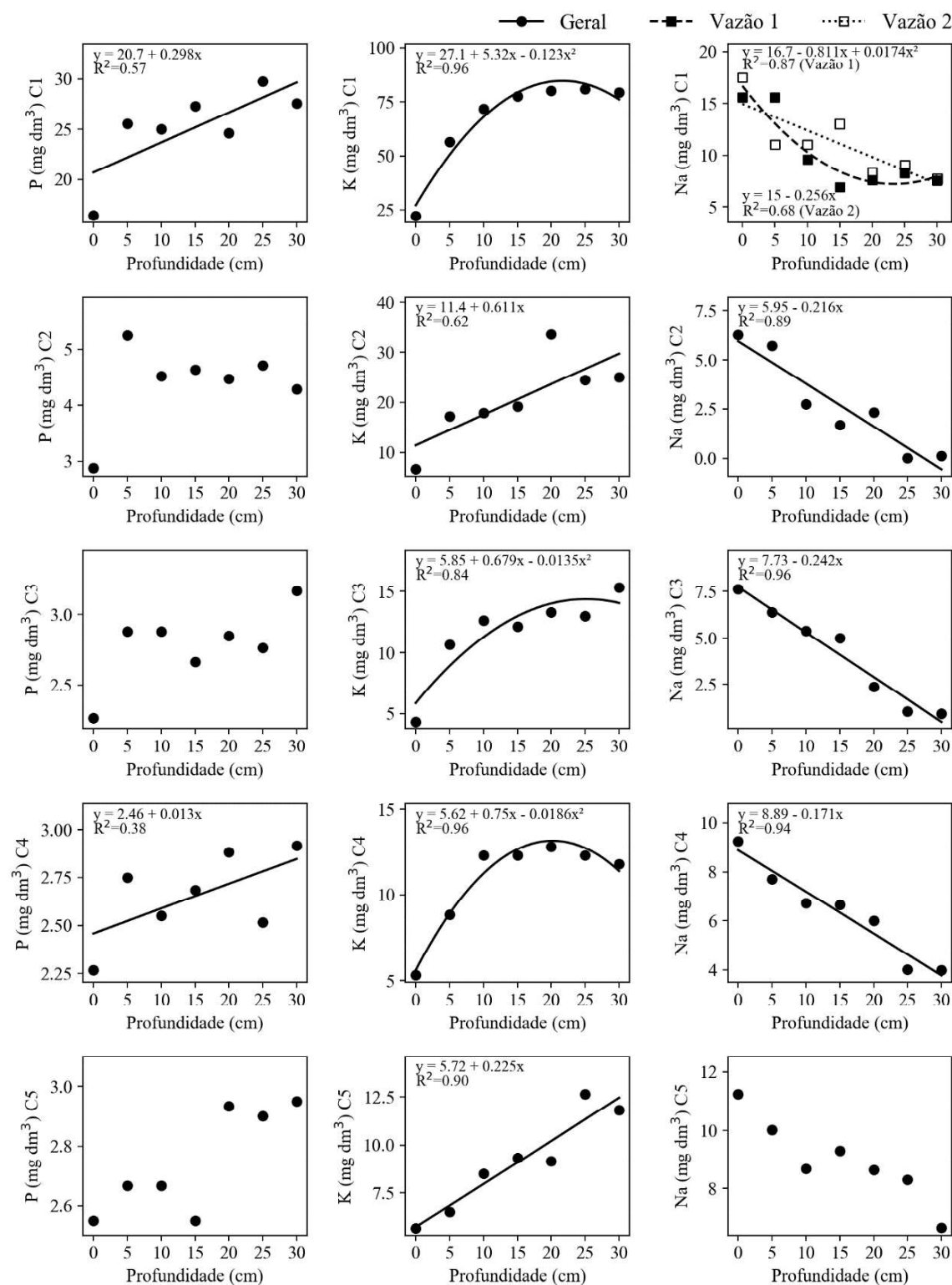
3,8	13,09 a	12,61 a	10,57 a
-----	---------	---------	---------

Quadrados médios seguidos de ***, ** e * são significativos a 0,1; 1 e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo pelo teste F. Dentro de cada profundidade de instalação do gotejador ou camada de solo, médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si à 0,05 pelo teste F.

A concentração de potássio nas camadas 3, 4 e 5 (K C3, K C4 e K C5) foi influenciada pelas diferentes vazões dos gotejadores. A vazão de 3,8 L h⁻¹ promoveu maior concentração de potássio em comparação com a vazão de 1,6 L h⁻¹ (Tabela 6). Observa-se também nessa tabela que a concentração do fósforo nas camadas 1 e 4, o potássio em todas as camadas e o sódio nas camadas de 1 a 4 foram influenciados pelas diferentes profundidades de instalação dos gotejadores na fertirrigação com ESS e adubação mineral.

Observa-se na Figura 4 que o aumento da profundidade de instalação dos gotejadores proporcionou um incremento linear na concentração de fósforo nas camadas 1 e 4. A concentração de P C1 ao final do experimento foi de 20,7 mg dm⁻³ para o GS e de 29,64 mg dm⁻³ para o gotejo a 30 cm de profundidade. Considerando os aportes de fósforo via adubação mineral, que a camada de 0-10 cm (C1) recebeu na semeadura (Tabela 3), esperava-se que o incremento na concentração de fósforo fosse de 20,43 mg dm⁻³. Já na fertirrigação com ESS o incremento esperado de fósforo era de 5,96 mg dm⁻³. O incremento na concentração de P C1 no tratamento com o gotejo a 30 cm de profundidade é um indicativo de baixa extração desse elemento na camada 1 do solo e, com isso, influenciou diretamente na produção de grãos e desenvolvimento vegetativo da parte aérea do feijão-caupi (Figuras 3 e 4).

Figura 4 - Fósforo (P), potássio (K) e sódio em diferentes camadas do solo, C1 0-10; C2 10-20; C3 20-30; C4 30-40; C5 40-55 cm, fertirrigados com esgoto sanitário sintético aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação



A concentração de P C4 ao final do experimento foi de 2,46 mg dm⁻³ para o GS e de 2,85 mg dm⁻³ para o gotejo a 30 cm de profundidade (Figura 4). Considerando o gotejo enterrado a 30 cm, o incremento esperado na concentração de P na camada 3 (20-30) e 4 (30-40 cm) via fertirrigação com ESS era de 2,98 mg dm⁻³ (Tabela 3). Com isso, observa-se que a fertirrigação com ESS a 30 cm de profundidade promoveu uma maior concentração final de fósforo nas camadas 3 e 4 em comparação com a fertirrigação nas demais profundidades (Figura 4).

O aumento da profundidade de instalação dos gotejadores promoveu um incremento linear na concentração de potássio nas camadas 2 e 5. Para a concentração de potássio nas camadas 1, 3 e 4, inicialmente tem-se um incremento na concentração de potássio com o aumento das profundidades de instalação dos gotejadores e ocorre uma estabilização e uma pequena queda na concentração de potássio para as maiores profundidades dos gotejadores (Figura 4).

A menor concentração de potássio em todas as camadas do solo, após a adubação mineral e fertirrigação com ESS, ocorreu via sistema de gotejamento superficial, com valores de 27,10; 11,40; 5,85; 5,62 e 5,72 mg dm⁻³ para as camadas 1 (0-10 cm), 2 (10-20 cm), 3 (20-30 cm), 4 (30-40 cm) e 5 (40-55 cm), respectivamente. De acordo com as equações de regressão (Figura 4), as maiores concentrações de potássio na camada 1 foi de 84,61 mg dm⁻³ para o gotejador instalado a 22 cm de profundidade, na camada 2 foi de 29,73 mg dm⁻³ para o gotejador a 30 cm de profundidade, na camada 3 foi de 14,39 mg dm⁻³ para o gotejador a 25 cm de profundidade, na camada 4 foi de 13,18 mg dm⁻³ com o gotejador a 20 cm de profundidade e na camada 5 foi de 12,47 mg dm⁻³ com o gotejador a 30 cm de profundidade.

A concentração de sódio no solo nas camadas de 1 a 4 decresceu com o aumento da profundidade dos gotejadores (Figura 4). A maior concentração de sódio na camada 1 e menor vazão (1,6 L h⁻¹) foi de 16,70 mg dm⁻³ para o GS e a menor concentração foi de 7,25 mg dm⁻³ para o gotejamento instalado a 23 cm de profundidade. Considerando essa mesma camada do solo, para a maior vazão (3,8 L h⁻¹), a maior concentração de sódio foi de 15,00 mg dm⁻³ para o GS e a menor concentração foi de 7,32 mg dm⁻³ para o gotejamento a 30 cm de profundidade (Figura 4).

A menor concentração de sódio nas camadas 2, 3 e 4 do solo após a fertirrigação com ESS ocorreu via sistema de gotejamento subsuperficial a 30 cm de profundidade, com valores de 0,00; 0,47 e 3,76 mg dm⁻³, respectivamente. A maior concentração de sódio nas camadas 2, 3 e 4 ocorreu com o tratamento via GS, com valores de 5,95; 7,73 e 8,89 mg dm⁻³, respectivamente (Figura 4).

3.3 Cálcio, magnésio e índice de saturação por sódio

As variáveis concentração de cálcio (Ca) nas camadas de 1 a 4, magnésio (Mg) nas camadas 1 e 2, e índice de saturação por sódio (ISNa) nas camadas de 1 a 4 foram influenciadas significativamente pelas profundidades de instalação dos gotejadores (Tabela 5).

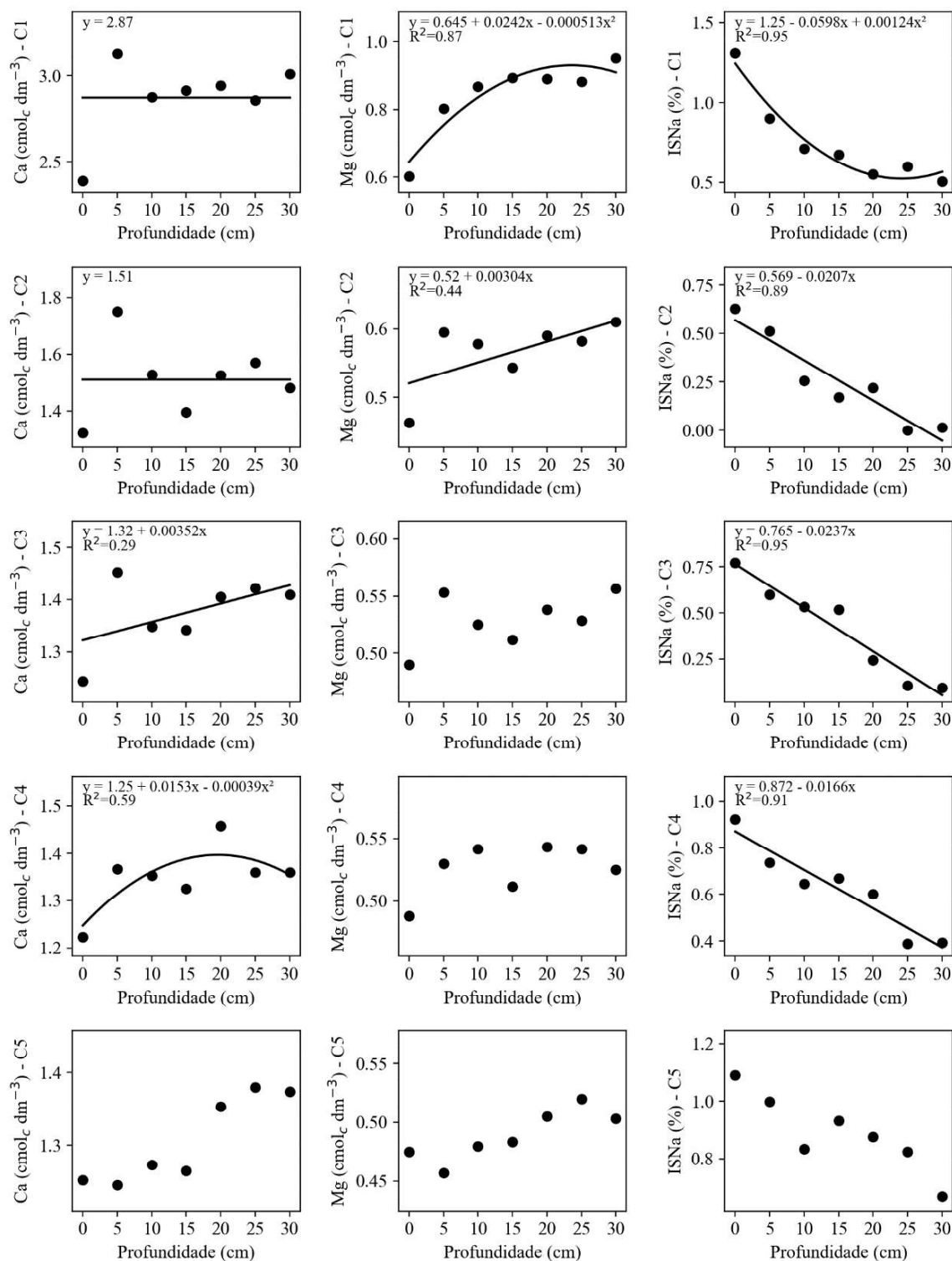
Tabela 7 - Resumo da análise de variância do cálcio (Ca), magnésio (Mg) e índice de saturação por sódio (ISNa) em diferentes camadas do solo C1 0-10, C2 10-20, C3 20-30, C4 30-40 e C5 40-55 cm fertirrigados com esgoto sanitário sintético aplicado por gotejadores com diferentes vazões (Q) e profundidades de instalação (Prof.)

Variáveis	Fonte de variação			CV (%)
	Q	Prof.	Q * Prof.	
Ca C1	1,20E+4 ^{ns}	3,25E-1 [*]	1,85E-1 ^{ns}	11,12
Ca C2	8,60E-4 ^{ns}	1,12E-1 ^{**}	3,02E-2 ^{ns}	10,90
Ca C3	6,44E-3 ^{ns}	2,96E-2 [*]	6,49E-3 ^{ns}	6,66
Ca C4	7,47E-3 ^{ns}	2,89E-2 [*]	7,23E-3 ^{ns}	7,65
Ca C5	1,72E-2 ^{ns}	2,17E-2 ^{ns}	1,22E-2 ^{ns}	9,25
Mg C1	1,04E-2 ^{ns}	7,85E-2 ^{***}	5,16E-3 ^{ns}	11,72
Mg C2	2,88E-4 ^{ns}	1,48E-2 [*]	5,70E-3 ^{ns}	11,58
Mg C3	2,75E-3 ^{ns}	3,28E-3 ^{ns}	1,85E-3 ^{ns}	7,59
Mg C4	1,27E-2 ^{ns}	2,43E-3 ^{ns}	3,21E-4 ^{ns}	8,33
Mg C5	1,61E-3 ^{ns}	2,78E-3 ^{ns}	2,30E-3 ^{ns}	8,47
ISNa C1	5,94E-2 ^{ns}	4,65E-1 ^{***}	4,06E-2 ^{ns}	19,07
ISNa C2	4,00E-3 ^{ns}	3,37E-1 ^{***}	4,38E-2 ^{ns}	81,24
ISNa C3	2,83E-2 ^{ns}	4,14E-1 ^{***}	1,69E-2 ^{ns}	35,17
ISNa C4	9,75E-3 ^{ns}	2,13E-1 ^{***}	1,59E-2 ^{ns}	27,59
ISNa C5	5,72E-3 ^{ns}	1,11E-1 ^{ns}	8,74E-3 ^{ns}	25,74

Quadrados médios seguidos de ***, ** e * são significativos a 0,1, 1 e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo pelo teste F.

Na Figura 5, observa-se que a concentração de Ca na camada 3 aumentou linearmente com as maiores profundidades de instalação dos gotejadores.

Figura 5 - Cálcio (Ca), magnésio (Mg) e índice de saturação por sódio (ISNa) em diferentes camadas do solo, C1 0-10; C2 10-20; C3 20-30; C4 30-40; C5 40-55 cm, fertirrigados com esgoto sanitário sintético aplicado por gotejadores instalados em diferentes profundidades



A menor concentração foi de $1,32 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ encontrado no sistema de GS e a maior concentração de Ca foi de $1,43 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o gotejo a 30 cm de profundidade. Na camada 4, o modelo ajustado foi o quadrático, sendo que a menor concentração de Ca foi de $1,25 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o tratamento com GS e a maior concentração foi de $1,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com o gotejador instalado a 20 cm de profundidade.

Analisando a concentração de magnésio na primeira camada do solo ajustou-se um modelo quadrático em função das profundidades de instalação dos gotejadores. Considerando esse modelo, a menor concentração de Mg foi de $0,65 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o GS e a maior concentração foi de $0,93 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o gotejamento a 24 cm de profundidade (Figura 5).

Na camada 2 (10-20 cm), a concentração de Mg aumentou linearmente com as profundidades dos gotejadores. A menor concentração foi de $0,52 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o GS e a maior concentração foi de $0,61 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o gotejamento a 30 cm de profundidade (Figura 5).

Os valores de ISNa nas camadas de 1 a 4 decresceram com o aumento da profundidade dos gotejadores (Figura 5). De acordo com as equações de regressão, o maior ISNa na camada 1 foi de 1,25% para o GS e o menor ISNa foi de 0,53% para o gotejamento a 24 cm de profundidade. Os maiores valores de ISNa nas camadas 2, 3 e 4 do solo, após a fertirrigação com ESS, ocorreram via sistema de GS resultando em 0,57; 0,77 e 0,87%, respectivamente. Os menores ISNa nas camadas 2, 3 e 4 ocorreram com o tratamento via gotejamento subsuperficial a 30 cm de profundidade, com valores de 0; 0,05 e 0,37%, respectivamente (Figura 5).

3.4 Potencial hidrogeniônico, condutividade elétrica, acidez potencial e saturação por base

A acidez potencial (H+Al) na camada 4 do solo (30-40 cm) foi influenciada significativamente pela interação das diferentes vazões e profundidades de instalação dos gotejadores. Nos tratamentos com os gotejadores instalados a 5, 15, 25 e 30 cm, a H+Al C4 foi maior para a vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ em comparação com a vazão de $3,8 \text{ L h}^{-1}$ (Tabela 8).

Tabela 8 - Resumo da análise de variância do potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), acidez potencial (H+Al), saturação por base (V) em diferentes camadas do solo, C1 0-10; C2 10-20; C3 20-30; C4 30-40; C5 40-55 cm, e comparação de média da acidez potencial na camada 4, fertirrigados com esgoto sanitário sintético aplicado por gotejadores com diferentes vazões (Q) e profundidades de instalação (Prof.)

Variáveis	Fonte de variação			
	Q	Prof.	Q * Prof.	CV (%)
pH C1	9,52E-4 ^{ns}	1,92E-2 ^{ns}	3,80E-2 ^{ns}	2,78
pH C2	3,15E-2 ^{ns}	2,72E-2 ^{ns}	1,35E-2 ^{ns}	2,03
pH C3	1,30E-1 ^{ns}	2,40E-2 ^{ns}	1,62E-2 ^{ns}	2,03
pH C4	1,97E-1 ^{ns}	2,25E-2 ^{**}	4,81E-3 ^{ns}	1,43
pH C5	1,72E-1 ^{ns}	3,90E-2 ^{ns}	8,98E-3 ^{ns}	2,48
CE C1	3,28E+4 ^{ns}	5,76E+4 ^{***}	7,98E+3 ^{ns}	17,72
CE C2	1,78E+1 ^{ns}	1,79E+3 ^{ns}	6,48E+1 ^{ns}	29,82
CE C3	1,23E+1 ^{ns}	1,85E+2 ^{ns}	1,12E+2 ^{ns}	18,17
CE C4	7,90E-1 ^{ns}	3,36E+1 ^{ns}	4,83E+1 ^{ns}	12,21
CE C5	8,65E+1 ^{ns}	2,18E+2 ^{ns}	4,22E+2 ^{ns}	29,05
H+Al C1	2,14E-1 ^{ns}	2,44E-2 ^{ns}	1,65E-2 ^{ns}	6,76
H+Al C2	1,48E-1 [*]	6,91E-3 ^{ns}	1,33E-2 ^{ns}	5,42
H+Al C3	2,38E-2 ^{ns}	3,71E-2 [*]	2,10E-2 ^{ns}	4,77
H+Al C4	2,00E-1 ^{ns}	6,65E-2 ^{**}	3,75E-2 [*]	4,61
H+Al C5	2,01E-1 ^{ns}	9,97E-2 ^{ns}	1,30E-2 ^{ns}	8,36
V C1	4,08E+1 ^{ns}	4,85E+1 ^{***}	9,91E+0 ^{ns}	4,54
V C2	2,36E+1 ^{ns}	3,34E+1 ^{**}	5,71E+0 ^{ns}	5,81
V C3	2,88E+0 ^{ns}	1,02E+1 ^{ns}	1,27E+0 ^{ns}	4,62
V C4	5,13E+1 ^{ns}	2,14E+1 ^{***}	2,76E+0 ^{ns}	3,71
V C5	1,36E+1 ^{ns}	2,82E+1 ^{**}	3,46E+0 ^{ns}	5,86

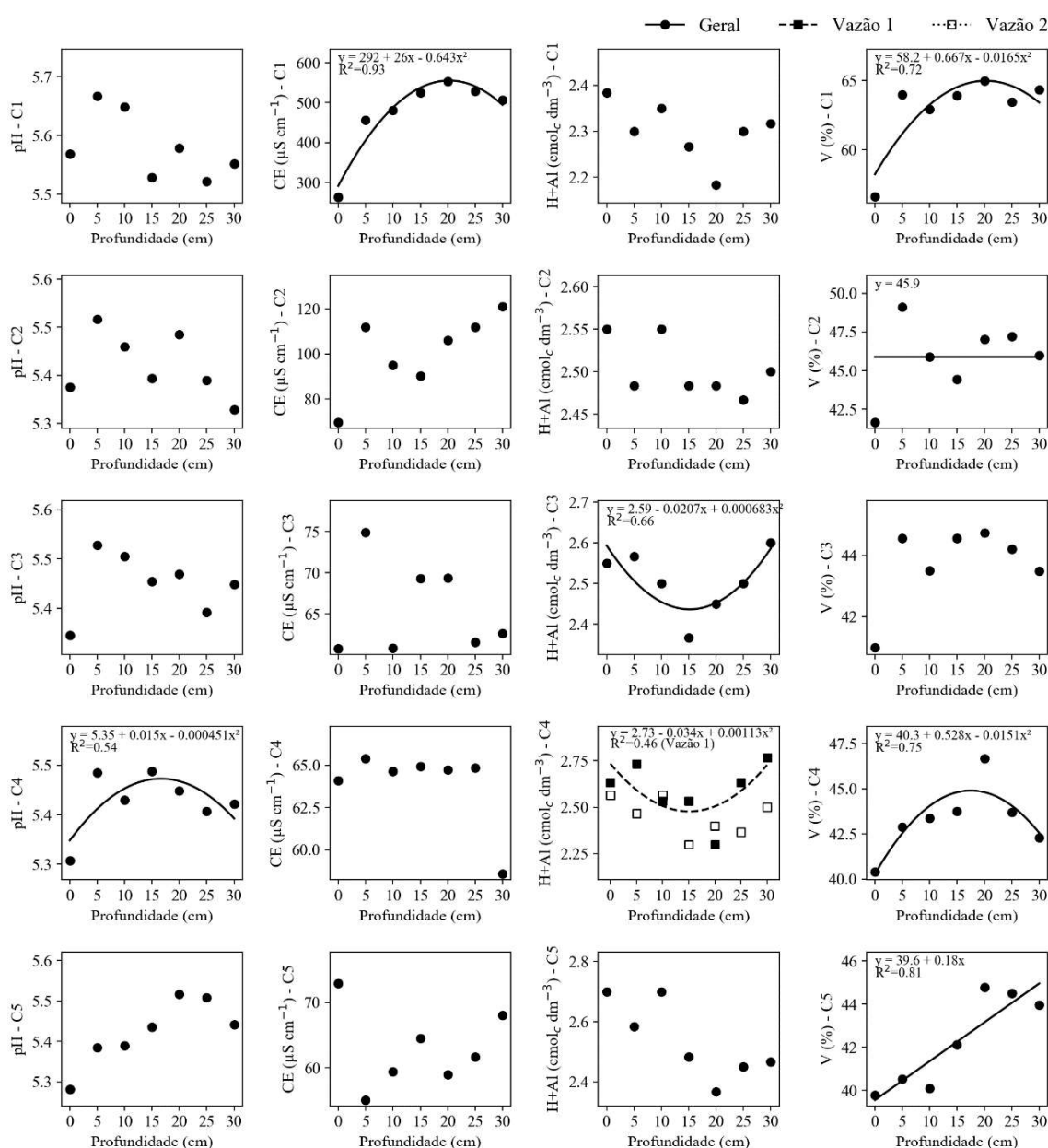
Variáveis	Vazão (L h ⁻¹)	Profundidade do gotejador (cm)						
		0	5	10	15	20	25	30
H+Al C4	1,6	2,63 a	2,73 a	2,53 a	2,53 a	2,30 a	2,63 a	2,77 a
	3,8	2,57 a	2,47 b	2,57 a	2,30 b	2,40 a	2,37 b	2,50 b

Quadrados médios seguidos de ***, ** e * são significativos a 0,1, 1 e 5%, respectivamente, e ^{ns} não significativo pelo teste F. Dentro de cada profundidade de instalação do gotejador, médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si à 0,05 pelo teste F.

A acidez potencial (H+Al) na camada 2 do solo (10-20 cm) foi influenciada significativamente pelas diferentes vazões. A H+Al C2 para a vazão de 1,6 L h⁻¹ foi de 2,56 cmol_c dm⁻³, e a H+Al C2 para a vazão de 3,8 L h⁻¹ foi de 2,44 cmol_c dm⁻³ (Tabela 8). Verifica-se também nessa tabela que o potencial hidrogeniônico (pH) na camada 4, a condutividade elétrica (CE) na camada 1, a acidez potencial (H+Al) nas camadas 3 e 4 e a saturação por base (V) nas camadas 1, 2, 4 e 5 foram influenciados significativamente pelas profundidades de instalação dos gotejadores.

Observa-se na Figura 6 que o pH do solo da camada 4 apresentou comportamento quadrático em função das diferentes profundidades de instalação dos gotejadores. O menor pH encontrado foi de 5,35 para o tratamento com o GS e o maior pH foi de 5,47 para o gotejador instalado a 17 cm de profundidade.

Figura 6 - Potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), acidez potencial (H+Al) e saturação por base (V) em diferentes camadas do solo, C1 0-10; C2 10-20; C3 20-30; C4 30-40; C5 40-55 cm, fertirrigados com esgoto sanitário sintético aplicado por gotejadores operando com diferentes vazões e profundidades de instalação



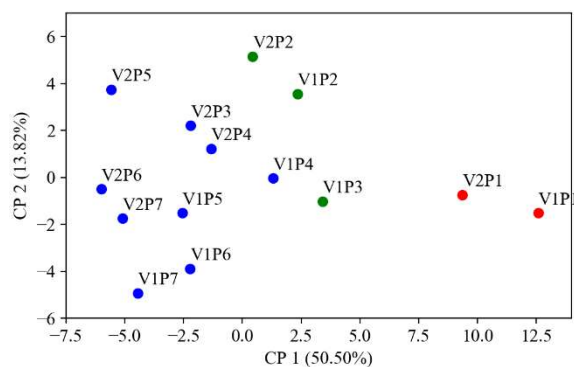
As menores concentrações de fósforo, potássio e magnésio na camada 1 do solo para o sistema de GS (Figura 4 e 5) contribuíram para a menor condutividade elétrica (CE) para esse sistema, que foi de $292 \mu\text{S cm}^{-1}$. A maior CE foi de $554,80 \mu\text{S cm}^{-1}$ para o gotejo enterrado a 20 cm de profundidade (Figura 6). Na mesma figura observa-se que os maiores valores de H+Al nas camadas 3 e 4 foram encontradas no sistema de gotejo superficial, de 2,59 e 2,73 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente. Já os menores valores de H+Al nas camadas 3 e 4 ocorreram nos tratamentos com gotejadores instalados a 15 cm de profundidade, sendo de 2,43 e 2,47 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente (Figura 6).

A saturação por base (V) é um indicativo das condições gerais de fertilidade do solo. Em função da maior produtividade e extração de nutriente na camada 1, o sistema de GS apresentou o menor valor de V, que correspondeu a 58,2%. A maior V na camada 1 foi de 64,94% para o tratamento com o gotejador a 20 cm de profundidade (Figura 6). Para a camada 4, a menor V foi de 40,3% para o GS e a maior V foi de 44,91% para o sistema a 17 cm de profundidade. A V na camada 5 incrementou linearmente com o aumento das profundidades dos gotejadores, sendo a menor V de 39,6% para o GS e a maior V foi de 45% para o gotejo a 30 cm de profundidade.

3.5 Componentes principais e análise de agrupamento

Para melhor compreensão da influência das profundidades de instalação dos gotejadores e vazões dos emissores sob os conjuntos de variáveis estudados, a análise de componentes principais (ACP), juntamente com a análise de agrupamento k-means, foi realizada para todas as variáveis conjuntamente (Figura 7).

Figura 7 - Componentes principais e análise de agrupamentos das diferentes vazões dos emissores (V1 e V2) e para as diferentes profundidades de instalação do gotejo (P1 a P7). Pontos de mesma cor pertencem a um mesmo grupo



De modo geral, verifica-se que os pontos referentes aos tratamentos com menor profundidade se distanciaram dos pontos de maior profundidade. Já para as vazões, não houve um padrão bem definido, corroborando com os resultados apresentados anteriormente, os quais indicaram baixa influência da vazão sobre as variáveis estudadas. Com base no agrupamento, verifica-se que, de modo geral, os tratamentos com GS ficaram alocados em um grupo e os demais tratamentos, referentes ao GSS, foram divididos em dois outros grupos.

4. DISCUSSÃO

No presente estudo, observou-se que o aumento da profundidade de instalação dos gotejadores influenciou negativamente a produção de grãos e o desenvolvimento vegetativo do feijão-caupi BRS Tumucumaque (Figura 3). O aprofundamento dos gotejadores acarreta redução na disponibilidade de água na camada de solo de 0-20 cm. Isto ocorre porque o gotejamento subsuperficial (GSS) apresenta uma dinâmica de água no solo diferente da apresentada pelo gotejamento superficial (GS). Essa dinâmica impacta no conteúdo de água do solo (Liu et al., 2021) e, possivelmente, interfere negativamente na absorção dos nutrientes aplicados via superfície, por meio da calagem e adubação de plantio.

A redução da umidade próximo da superfície do solo com o aumento das profundidades de instalação dos gotejadores está apresentado na Figura 3, representado pelo fluxo de vapor de água. A redução do fluxo de vapor de água em função do aumento da profundidade de instalação dos gotejadores é devido à redução de água nas camadas superiores do solo. A uniformidade de distribuição da umidade do solo exerce uma importante influência nos fatores ambientais, como disponibilidade de nutrientes, pH e temperatura das zonas radiculares das culturas (Wang et al., 2018), afetando assim o crescimento radicular e a produtividade da cultura. Em relação aos sistemas de GSS, Lamm (2014) relatou que quando a camada superficial do solo permanece seca, o nutriente aplicado no plantio se torna indisponível para a cultura, acarretando em redução nos rendimentos produtivos.

Outro fator importante da umidade próximo da superfície do solo é a regulação térmica (Figura 3). Essa condição é favorável para a germinação e estabelecimento adequado do feijão-caupi nos períodos mais quentes do ano, pois, a água presente na superfície ameniza a temperatura do solo. A menor temperatura do solo proporciona redução no estrangulamento do hipocótilo e minimiza outros danos físico-químicos que podem ser ocasionados às plântulas e comprometer negativamente o seu estabelecimento. A faixa de calor considerada ótima para o feijão-caupi está compreendida entre 20 e 30 °C (Nunes et al., 2019). Diante disso, e analisando a Figura 3, observa-se que apenas o tratamento com GS está dentro dessa escala.

O umedecimento da superfície do solo com o gotejo superficial também apresenta suas desvantagens (Nogueira et al., 2021). Uma delas seria a maior perda

de água para a atmosfera via evaporação. Outra desvantagem é o favorecimento do banco de semente de plantas daninhas, contribuindo assim, com o seu estabelecimento e desenvolvimento (Figura 3). No entanto, essa condição não foi suficiente para comprometer a produção do feijão-caupi em relação aos demais tratamentos.

Wu et al. (2019) verificaram, em solo arenoso, que o acúmulo de matéria seca do milho foi maior nos tratamentos com GS em comparação com o sistema de GSS. Considerando esse mesmo trabalho, os autores observaram, em solo argiloso, que a produção do milho nos tratamentos com GS e GSS foram superiores ao cultivo sem irrigação em 17 e 12%, respectivamente.

A principal vantagem da fertirrigação com esgoto sanitário sintético (ESS) por meio do GSS é a disponibilização de nutrientes na profundidade desejada, principalmente de elementos pouco móveis no solo, como no caso do fósforo. Observou-se na Figura 4 que houve incremento na concentração de fósforo na camada de 30-40 cm do solo para as maiores profundidades de instalação dos gotejadores.

Wang et al. (2018) verificaram, em tratamentos com gotejadores instalados na profundidade de 20 cm, que os teores de nitrogênio total e fósforo total da raiz do tomateiro foram 1,18 e 1,47 vezes superiores aos da irrigação por gotejamento superficial, respectivamente. O fósforo é propenso a fixação no ponto de aplicação, sendo assim, a aplicação via fertirrigação por gotejadores instalados a 20 cm resultou em P mais assimilável em profundidade em comparação com os tratamentos por gotejo superficial (Hebbar et al., 2004).

A adubação mineral realizada no momento da semeadura e distribuída na superfície do solo (camada 1), correspondeu a 77,40% do fósforo e 60,38% do potássio total aplicado no presente estudo (Tabela 3). Considerando que a água é o principal meio de transporte dos nutrientes para a planta, nota-se que a extração desses nutrientes na camada 1 do solo decresceu com o aumento das profundidades de instalação dos gotejadores (Figura 4), corroborando de forma inversa com o fluxo de vapor de água (Figura 3).

Wu et al. (2019) estudando o efeito da fertirrigação por GS e GSS no cultivo do milho, verificaram que, para o solo argiloso, o teor de umidade foi mais baixo no tratamento com GSS na profundidade de 0-20 cm, em comparação com o GS. Além

disso, a extração de N, P e K foi mais elevada em condições com maior umidade disponível. Esses mesmos autores verificaram que as extrações de fósforo e potássio foram maiores nos tratamentos com GS em relação ao GSS. Portanto, a baixa disponibilidade de água na camada de 0-20 pode afetar a mineralização e a disponibilidade de nutrientes no solo (Lamm, 2014), especialmente para P e K, cujos movimentos ocorrem principalmente por difusão.

A concentração de potássio na camada 2 aumentou linearmente em função do incremento das profundidades de instalação dos gotejadores. Considerando as médias dos tratamentos, para o gotejo instalado a 20 cm de profundidade, a concentração de potássio foi maior, indicando a capacidade do ESS em disponibilizar nutrientes nas profundidades de solo desejada (Figura 4). Araújo et al. (2020) verificaram que o uso agrícola de esgoto sanitário é uma alternativa para disponibilizar água e nutrientes para as plantas e reciclar nutrientes para o solo.

O melhor modelo para explicar a concentração de potássio nas camadas 3 e 4 é o quadrático. Essas camadas representam as profundidades de 20-30 e 30-40, respectivamente. Observa-se inicialmente um aumento do K e uma pequena redução desse nutriente nas maiores profundidades de gotejo. Essa redução de K representa a remoção desse nutriente pelo feijão-caupi nessas camadas (Figura 4).

A concentração de K para a última camada do solo aumentou linearmente em função das profundidades dos gotejadores. Considerando a mobilidade do K, possivelmente isso ocorreu em função da lixiviação desse elemento. Como o gotejador a 30 cm de profundidade está mais próximo dessa camada do solo, inferiu-se que a fertirrigação a 30 cm contribuiu mais para a concentração de K na profundidade de 40-55 cm (Figura 4).

A maior concentração de sódio trocável (Na) na camada 1 do solo ocorreu com o tratamento por gotejamento superficial. Isso ocorreu em função da fertirrigação com o ESS na superfície do solo, e decresceu com o aumento da profundidade dos gotejadores. No entanto, nas camadas 2, 3 e 4, o comportamento foi similar. Possivelmente, o Na nessas camadas foi parcialmente absorvido pelo feijão-caupi nos tratamentos com GSS, pois a relação de Na/K nessas camadas eram maiores em comparação com a camada 1 (0-10 cm) que recebeu 60,38% do potássio via adubação mineral. Essa maior absorção de Na, em função das maiores profundidades

de gotejo, influenciou negativamente a produção de grãos e desenvolvimento do feijão-caupi (Figura 4).

O Ca nas camadas 3 e 4 e o Mg nas camadas 1 e 2 foram menores para os tratamentos GS em comparação com o GSS (Figura 5), assim como o P nas camadas 1 e 4 e o potássio em todas as camadas do solo (Figura 4). Considerando que o feijão-caupi nos tratamentos com GS apresentou maior desenvolvimento vegetativo e maior produção de grãos (Figura 3), em consequência disso, ocorreu maior extração de nutrientes e uma menor extração de Na. Dessa forma, o solo ficou com uma maior concentração de Na trocável, resultando em um maior índice de saturação de sódio (ISNa) ou porcentagem de sódio trocável (PST) (Figura 5).

Somente a informação do teor de Na disponível no solo não é suficiente para avaliar os efeitos adversos sob o crescimento e desenvolvimento das plantas. É importante conhecer também a proporção em relação aos demais cátions do solo, como K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (Prezotti e Guarçoni, 2013). Solos com ISNa menor que 7% são considerados não-sódicos (Amorim et al., 2010). Na presente pesquisa, os valores de ISNa foram menores que 1,25%, indicando assim, que o tempo para este estudo com fertirrigação de ESS por diferentes sistemas de irrigação não proporcionou mudanças que comprometessem a qualidade química do solo.

O pH na camada 4 do solo foi menor para o GS e aumentou em função do aprofundamento dos gotejadores até a profundidade de 16 cm (Figura 6). Em todas as camadas avaliadas a presença do Al^{3+} foi igual a zero, ou seja, a acidez potencial foi influenciada diretamente pela presença de H^+ trocável nas camadas 3 e 4 do solo (Figura 6).

A planta, para absorver um cátion do solo, libera um próton de H^+ , e com isso, contribui para a redução do pH do solo e aumento da acidez potencial (Primavesi et al., 2005). De fato, ocorreu uma maior absorção de cátions nos tratamentos com GS, o que resultou em um menor pH e uma maior acidez potencial. Isso também foi observado para as profundidades dos gotejadores de 25 e 30 cm, que tiveram uma redução na concentração de K (Figura 4) e Ca (Figura 5) na camada 4 do solo em virtude da extração desses nutrientes, e consequentemente uma maior acidez potencial.

A CE e a saturação por base (V) da camada de 0-10 cm do solo foram menores para o sistema de GS. Esse tratamento foi aquele que obteve mais aporte de

nutrientes na camada superficial (Tabela 3). Ao final do experimento corroborou com as maiores extrações de nutrientes pelo tratamento com o GS (Figura 6).

O comportamento quadrático da CE coincidiu com o do K (Figura 4) e o do magnésio (Figura 5) para a camada 1 do solo. Isso demonstra a diminuição da extração desses nutrientes com o aumento das profundidades dos gotejadores e, por final, uma menor contribuição dos gotejadores nas maiores profundidades para o aporte de nutrientes via fertirrigação com ESS para a camada 1 do solo. O GSS em maior profundidade, particularmente em solos argilosos, possivelmente induz a deficiência de oxigênio na rizosfera e reduz o volume de raiz, impondo uma restrição sobre a habilidade da planta em extrair água e nutrientes (Bhattarai et al., 2008).

Para adequados níveis de germinação e vigor, as sementes de feijão-caupi podem tolerar uma CE em torno de até $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Nunes et al., 2019). Considerando que a maior CE encontrada no presente estudo foi de $554,80 \mu\text{S cm}^{-1}$ (Figura 6), que equivale a aproximadamente a $0,55 \text{ dS m}^{-1}$, a fertirrigação com ESS, mais a complementação com adubação mineral, não comprometeu a condição química do solo para o período estudado.

O aumento da saturação por bases nas camadas 4 e 5 coincide com o incremento da fertilidade por meio do ESS. Já na camada 4 os gotejadores a 25 e 30 cm de profundidade apresentaram uma redução de V, o que representa a extração de nutrientes (Figura 6). Assim como sugerido para a lixiviação de potássio na camada 5 (Figura 4), nas maiores profundidades de instalação dos gotejadores, ocorreu também um aumento da V nessa camada 5 (Figura 6).

Por fim, considerando o efeito das vazões dos emissores, observa-se que eles influenciaram principalmente na concentração de potássio nas camadas 3, 4 e 5 (Tabela 6). Verificou-se que a concentração final de K foi maior no tratamento com vazão de $3,8 \text{ L h}^{-1}$ em comparação com os emissores de $1,6 \text{ L h}^{-1}$. Emissores de menor vazão apresentam uma melhor distribuição da água, principalmente em solos argilosos. Dessa forma, nessas camadas, possivelmente houve uma melhor distribuição de água, o que resultou em uma melhor distribuição dos nutrientes. Assim, favoreceu-se uma maior absorção de potássio para os tratamentos com emissores de $1,6 \text{ L h}^{-1}$. Os tratamentos com essa mesma vazão apresentaram uma maior acidez potencial na camada 4 (Tabela 8) em função da liberação de H^+ para absorção de potássio (Primavesi et al., 2005).

Quando a intensidade de aplicação do emissor é maior que a taxa de infiltração de água do solo, a carga de pressão ao redor do emissor torna-se positiva, gerando uma contrapressão que reduz o gradiente hidráulico entre o interior do emissor e o solo, conseqüentemente reduzindo a vazão do emissor. Em solos de textura fina, o efeito da contrapressão é mais pronunciado, resultando em uma maior redução na vazão do emissor. Essa é uma das principais desvantagens do sistema por GSS, pois, pode afetar o desempenho das irrigações. Quando a água é aplicada em diferentes quantidades, ocorrem desuniformidades no tempo e no espaço e, conseqüentemente, isso também afetará nas taxas de aplicação dos nutrientes (Nopens et al., 2001).

Com as análises de componentes principais e de agrupamento, é possível verificar que, de maneira geral, o GS se distanciou das demais profundidades do GSS. No entanto, foram formados três grupos, os quais foram compostos pelo GS, as profundidades intermediárias de 5 e 10 cm e as maiores profundidades de instalação dos gotejadores de 15, 20, 25 e 30 cm (Figura 7).

Uma decisão importante no uso do GSS para a disposição de ESS refere-se à profundidade da instalação do gotejador. A profundidade adequada de instalação varia de acordo com a cultura, tipo de solo, fonte de água, clima, práticas culturais e preferências do projetista de irrigação.

Observou-se que a fertirrigação com ESS por meio do GS possibilitou uma maior produção de grãos do feijão-caupi, o que deve estar relacionado a maior extração de P, K, Ca e Mg em função da menor concentração final desses elementos no solo em cada camada estudada. Diante disso, em termos comparativos, o GSS não se mostrou apropriado para a produção do feijão-caupi cultivado em solo argiloso e em casa de vegetação. No entanto, foi efetivo para disponibilizar nutrientes em profundidade via ESS. As respostas para as alterações químicas do solo não foram claras para as duas vazões estudadas. De maneira geral, uma leve vantagem foi observada para a vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ em comparação com a vazão de $3,8 \text{ L h}^{-1}$. Assim, são necessários mais estudos para investigar o efeito das diferentes vazões em sistemas de GSS.

5. CONCLUSÃO

O aumento da profundidade de instalação do gotejador influencia negativamente a produção de grãos e o desenvolvimento vegetativo do feijão-caupi cultivado em solo argiloso e em casa de vegetação.

A fertirrigação com esgoto sanitário sintético (ESS) em profundidade incrementa a concentração de P no solo.

As concentrações de P, K, Ca e Mg no solo, após o término do experimento, são maiores para o sistema de gotejamento subsuperficial e incrementam com aumento das profundidades dos gotejadores.

A concentração de sódio no solo é menor para as maiores profundidades de instalação dos gotejadores.

A aplicação de esgoto sanitário sintético em diferentes profundidades de instalação dos gotejadores eleva a saturação por bases (V) do solo.

As alterações químicas do solo e as respostas do feijão-caupi não foram conclusivas para as duas vazões avaliadas. De maneira geral, uma modesta vantagem foi observada para a vazão de 1,6 L h⁻¹. Entretanto, mais estudos são necessários para investigar o efeito das diferentes vazões e profundidades de instalação dos sistemas por gotejamento subsuperficial.

REFERÊNCIAS

- Alves, P. F. S., Santos, S. R., Kondo, M. K., Pegoraro, R. F. & Portugal, A. F. (2019). Soil chemical properties in banana crops fertigated with treated wastewater. *Revista Caatinga*. 32(1), 234-242. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n123rc>
- Amorim, J. R. A., Cruz, M. A. S., Resende, R. S., Bassoi, L. H. & Silva Filho, J. G. (2010). Espacialização da porcentagem de sódio trocável do solo no perímetro irrigado Califórnia, em Canindé de São Francisco, Sergipe. *Embrapa Tabuleiros Costeiros-Documents*, Brasília. 17p.
- Araújo, E. D., Santos, S. R., Alves, P. F. S., Kondo, M. K., Carvalho, A. J. & Feitosa, F. M. (2020). Agronomic performance of common bean crops fertigated with treated sewage and mineral fertilizer. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 24(8), 520-527. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n8p520-527>
- Bernardo, S., Mantovani, E. C., Silva, D. D. & Soares, A. A. (2019). *Manual de irrigação*. 9 ed. Editora UFV, Viçosa. 545p.
- Bhattarai, S. P., Midmore, D. J. & Pendergast, L. (2008). Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygation treatments in vertisols. *Irrigation Science*. 26(5), 439. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0112-5>
- Çolak, Y. B., Yazar, A., Sesveren, S. & Çolak, İ. (2017). Evaluation of yield and leaf water potential (LWP) for eggplant under varying irrigation regimes using surface and subsurface drip systems. *Scientia Horticulturae*. 219, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.02.051>
- Farooq, M., Rehman, A., Al-Alawi, A. K. M., Al-Busaidi, W. M. & Lee, D. J. (2020). Integrated use of seed priming and biochar improves salt tolerance in cowpea. *Scientia Horticulturae*. 272, 109507. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109507>
- Hebbar, S. S., Ramachandrappa, B. K., Nanjappa, H. V & Prabhakar, M. (2004). Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *European Journal of Agronomy*. 21(1), 117-127. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00091-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00091-1)
- IBRAFE - Instituto Brasileiro do Feijão e Pulses (2021) Preço nacional do feijão. Available at: <<https://www.ibrafe.org/>>. Accessed on July 02, 2021.
- Kodinariya, T. & Makwana, P. R. (2013). Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*. 1(6), 90-95.
- Lamm, F. R. (2014). Irrigation and nitrogen management for subsurface drip irrigated corn - 25 years of K-State's Efforts. In: ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting. Montreal, 141914980. <https://doi.org/10.13031/aim.20141914980>

- Liu, Y., Hu, C., Li, B., Ding, D., Zhao, Z., Fan, T. & Li, Z. (2021). Subsurface drip irrigation reduces cadmium accumulation of pepper (*Capsicum annuum* L.) plants in upland soil. *Science of The Total Environment*. 755, 142650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142650>
- Matos, A. T. & Matos, M. P. (2017). Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. Editora UFV, Viçosa. 371p.
- Melo, F. B., Cardoso, M. J. & Salviano, A. A. C. (2005). Fertilidade do solo e adubação. In: Freire Filho, F. R., Lima, J. A. A., Ribeiro, V. Q. (Eds.). *Feijão-caupi: Avanços Tecnológicos*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, p. 229-242.
- Nogueira, V. H. B., Diotto, A. V., Thebaldi, M. S., Colombo, A., Silva, Y. F., Lima, E. M. C. & Resende, G. F. L. (2021). Variation in the flow rate of drip emitters in a subsurface irrigation system for different soil types. *Agricultural Water Management*. 243, 106485. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106485>
- Nopens, I., Capalozza, C. & Vanrolleghem, P. A. (2001). Stability analysis of a synthetic municipal wastewater. University of Gent, Belgium. 22p.
- Nunes, L. R. L., Pinheiro, P. R., Pinheiro, C. L., Lima, K. A. P. & Dutra, A. S. (2019). Germination and vigour in seeds of the cowpea in response to salt and heat stress. *Revista Caatinga*. 32(1), 143-151. <https://doi.org/10.1590/1983-21252019v32n115rc>
- Palacios-Díaz, M. P., Mendoza-Grimón, V., Fernández-Vera, J. R., Rodríguez-Rodríguez, F., Tejedor-Junco, M. T. & Hernández-Moreno, J. M. (2009). Subsurface drip irrigation and reclaimed water quality effects on phosphorus and salinity distribution and forage production. *Agricultural Water Management*. 96(11), 1659-1666. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.021>
- Prezotti, L. C. & Guarçoni, A. M. (2013). Guia de interpretações de análise de solo e foliar. Incaper, Vitória. 104p.
- Primavesi, A. C., Primavesi, O., Corrêa, L. A., Cantarella, H. & Silva, A. G. (2005). Absorção de cátions e ânions pelo capim-coastcross adubado com uréia e nitrato de amônio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 40(3), 247-253. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000300008>
- Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G. & Alvarez, V. H. (1999). Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Editora SBCS, Viçosa. 359p.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumberras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo Filho, J. C., Oliveira, J. B. & Cunha, T. J. F. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. 5 ed. Embrapa, Brasília. 356p.
- Shah, E., Liebrand, J., Vos, J., Veldwisch, G. J. & Boelens, R. (2018). The UN water and development report 2016 "Water and Jobs": A critical review. *Development and Change*. 49(2), 678-691. <https://doi.org/10.1111/dech.12395>

- Soliman, A. I. E., Morad, M. M., Wasfy, K. I. & Moursy, M. A. M. (2020). Utilization of aquaculture drainage for enhancing onion crop yield under surface and subsurface drip irrigation systems. *Agricultural Water Management*. 239, 106244. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106244>
- Souza, C. F., Folegatti, M. V., Matsura, E. E. & Or, D. (2006). Calibração da reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo. *Engenharia Agrícola*. 26, 282-291. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100030>
- Wang, J., Niu, W., Li, Y. & Lv, W. (2018). Subsurface drip irrigation enhances soil nitrogen and phosphorus metabolism in tomato root zones and promotes tomato growth. *Applied Soil Ecology*. 124, 240-251. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.11.014>
- Wang, Z., Li, J., Hao, F. & Li, Y. (2017). Effects of phosphorus fertigation and lateral depths on distribution of Olsen-P in soil and yield of maize under subsurface drip irrigation. In: *ASABE Annual International Meeting*. St. Joseph, 1701105. <https://doi.org/10.13031/aim.201701105>
- Wu, D., Xu, X., Chen, Y., Shao, H., Sokolowski, E. & Mi, G. (2019). Effect of different drip fertigation methods on maize yield, nutrient and water productivity in two-soils in Northeast China. *Agricultural Water Management*. 213, 200-211. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.018>

CONCLUSÕES GERAIS

A capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a água disponível no substrato aumentam com as doses crescentes de hidrogel nos substratos hidratados com água destilada ou esgoto sanitário sintético.

A condutividade elétrica, os sólidos dissolvidos totais e o pH aumentam com as doses crescentes de hidrogel no substrato hidratado com as diferentes fontes hídricas.

O uso de esgoto sanitário na emergência do feijão-caupi cv. BRS Tumucumaque aumenta a condutividade elétrica e os sólidos dissolvidos totais do substrato em comparação com a água destilada.

O hidrogel aplicado próximo das sementes afetam negativamente a emergência do feijão-caupi, independente da hidratação com água destilada ou esgoto sanitário.

O uso de esgoto sanitário possibilita maior emergência do feijão-caupi em comparação com a água destilada para as condições do presente estudo.

Com o aumento das doses de hidrogel ocorre uma redução da altura das plântulas de feijão-caupi, hidratado com água destilada ou esgoto sanitário.

A emergência das plantas de feijão-caupi é comprometida com o aumento da profundidade de instalação dos gotejadores, não sendo afetada pelas diferentes vazões dos emissores.

O aumento da profundidade dos gotejadores em solo argiloso influenciou negativamente as variáveis de produção, fisiológicas e o desenvolvimento das raízes do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário.

As respostas do feijão-caupi para o gotejamento superficial foram mais promissoras para as condições do presente estudo em comparação com o gotejamento subsuperficial.

As respostas produtivas, fisiológicas e da morfologia das raízes do feijão-caupi não foram conclusivas para as duas vazões estudadas. De uma maneira geral, uma leve vantagem foi observada para a vazão de 1,6 L h⁻¹ em comparação com a vazão de 3,8 L h⁻¹. Entretanto, mais estudos são necessários para investigar o efeito das diferentes vazões em sistemas de gotejamento subsuperficial.

O aumento da profundidade de instalação do gotejador influencia negativamente a produção de grãos e o desenvolvimento vegetativo do feijão-caupi cultivado em solo argiloso e em casa de vegetação.

A fertirrigação com esgoto sanitário sintético em profundidade incrementa a concentração de P no solo.

As concentrações de P, K, Ca e Mg no solo, após o término do experimento, são maiores para o sistema de gotejamento subsuperficial e incrementam com aumento das profundidades dos gotejadores.

A concentração de sódio no solo é menor para as maiores profundidade de instalação dos gotejadores.

A aplicação de esgoto sanitário sintético em diferentes profundidades de instalação dos gotejadores eleva a saturação por bases (V) do solo.

Por fim, com os trabalhos realizados e considerando-se as condições testadas, observa-se que a aplicação de hidrogel na semeadura do feijão-caupi não é recomendada. O esgoto sanitário é uma fonte viável para fornecer nutrientes para as plantas, e o gotejamento subsuperficial não apresentou viabilidade técnica para as condições do estudo.