

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

TESE

**Crescimento Inicial de Plantas de Pimenta do Reino:
Substratos, Regimes de Irrigação e Biocontrole de
Fusarium spp. com *Trichoderma* spp.**

Eleandro Silva da Cruz

2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**CRESCIMENTO INICIAL DE PLANTAS DE PIMENTA DO REINO:
SUBSTRATOS, REGIMES DE IRRIGAÇÃO E BIOCONTROLE DE
Fusarium ssp. COM *Trichoderma spp.***

ELEANDRO SILVA DA CRUZ

Sob orientação do Professor
Daniel Fonseca de Carvalho

e Co-orientação do Professor
Marinaldo Ferreira Pinto

e Co-orientação da Professora
Margarida Goréte Ferreira do Carmo

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração Manejo do Solo e Qualidade Ambiental

Seropédica - RJ
Abril de 2020

C955c Cruz, Eleandro Silva da, 1979-
Crescimento inicial de plantas de pimenta do
reino: substratos, regimes de irrigação e biocontrole
de Fusarium spp. com Trichoderma spp. / Eleandro
Silva da Cruz. - Niterói, 2020.
100 f.: il.

Orientador: Daniel Fonseca de Carvalho.
Coorientador: Marinaldo Ferreira Pinto.
Coorientadora: Margarida Goréte Ferreira do Carmo.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Ciência do Solo, 2020.

1. Piper nigrum L.. 2. Fusariose. 3. Fluorescência
da clorofila a. 4. Manejo da irrigação. I. Carvalho,
Daniel Fonseca de, 1968-, orient. II. Pinto,
Marinaldo Ferreira, 1984-, coorient. III. Carmo,
Margarida Goréte Ferreira do, 1963-, coorient. IV
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do
Solo. V. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.

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

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

ELEANDRO DA SILVA CRUZ

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

TESE APROVADA EM 19/02/2020.

Daniel Fonseca de Carvalho. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Everaldo Zonta. Dr. UFRRJ

Leonardo Oliveira Medici. Dr. UFRRJ

Robson Bonomo. Dr. UES

Carlos Rodrigues Pereira. Dr. UFF

DEDICATÓRIA

*À Estela, Sheila, Marina,
Lorena e Sarah, mulheres da
minha vida, dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pelo milagre da vida, e por me presentear além do que mereço.

Agradeço aos meus pais Estela e José pela educação e exemplos de vida, os quais me acompanham onde quer que eu esteja.

Agradeço às amadas Sheila, Marina, Lorena e Sarah, por compartilharem todos os momentos vividos, e pelo suporte e amor dispensados, sem os quais nada teria sido possível.

Agradeço à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela formação profissional e por viabilizar mudanças de condição social, não só minha e de minha família, como também de milhares de cidadãos ao longo de sua existência.

Agradeço ao Professor Daniel pela orientação e amizade dispensadas desde o ano 2000, as quais contribuíram de forma significativa para minha formação profissional e crescimento pessoal.

Sou grato ao Programa de Pós-graduação em Agronomia – Ciência do Solo, por oferecer formação de qualidade e gratuita desde 1965. Agradeço ainda o apoio prestado por Marcos, Michele e Vagner.

Agradeço aos Professores Marinaldo e Margarida Goréte pela co-orientação, Leonardo Medici, Everaldo Zonta e Paulo Sérgio Leles pelos valiosos conselhos durante os trabalhos.

Agradeço aos meus irmãos Eleno e Wagner, à minha sogra Elza, minha prima Fabiana e suas respectivas famílias, pelo apoio fundamental, que me deu condições para desenvolver o presente trabalho.

Agradeço ao Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – Incra, por privilegiar a qualificação de seu corpo técnico, e me conceder a liberação para a realização do curso, especialmente através de Cândido, Laércio e Evans.

Agradeço ao Grupo de Pesquisa Água e Solo em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de compartilhar dos conhecimentos gerados, e em especial aos amigos Clodoaldo, Wendell, Gean e João Felício, pela amizade e auxílio nas atividades executadas.

Aos amigos do Laboratório de Epidemiologia e Patologia de Sementes/UFRRJ pela imensa ajuda nos processos de manipulação das cepas de *Trichoderma* spp. e *Fusarium*, em especial a Daniele, Carlos, Maiara e Cíntia.

Ao Dr. Júlio pelo inestimável apoio na realização de análises no Laboratório de Análise de Resíduos e da Interação Solo-Planta/UFRRJ, e aos Drs. Jair e Adriana pelo apoio na realização de análises no Laboratório de Absorção Atômica/UFRRJ.

Ao Laboratório de Sistemática e Ecologia de Fungos da Universidade Federal de Lavras, através do Prof. Ludwig Pfennig e do servidor Edson, pela cessão do isolado de *Fusarium solani* f.sp. *piperis* utilizada.

Agradeço a Emanuel, Ana e Victor pela ajuda no transporte do isolado de *Fusarium*, o que viabilizou este trabalho.

À Ballagro Agro Tecnologia e à Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira, pela cessão de produtos à base *Trichoderma* spp. utilizadas neste trabalho.

À Caeté Mármore e Granitos (Vargem Alta/ES) e Perim Granitos Ltda. (Venda Nova do Imigrante/ES) por cederem o pó de rocha granítica utilizado neste trabalho.

Ao amigo Gilvando Fábio pela amizade e apoio durante a realização deste trabalho.

Aos amigos Abel e João Luiz, verdadeiros promotores de desenvolvimento rural do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural – Incaper, pelo valoroso trabalho que realizam em prol da agricultura, e pelo apoio na obtenção de material propagativo.

Agradeço ao produtor rural Sr. Alvino Figueira, de São Gabriel da Palha/ES, pela cessão de material propagativo, fundamental para a realização dos experimentos.

Agradeço aos amigos Carlos, Juliana, pais de Heitor, Otto e Theo, Ricardo, pai de Maristela, e João Ciriaco pela amizade e apoio inestimável durante a realização deste trabalho.

Agradeço a todos que participaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho, e, em especial aos servidores públicos, sem os quais certamente haveria ainda menos justiça social e cidadania no Brasil.

BIOGRAFIA

Nascido em Niterói/RJ, em 1979, filho da Sra. Estela Maria da Silva e do Sr. José da Cruz, iniciou a alfabetização em 1986, na Escola Estadual Almirante Álvaro Alberto, em Paraty/RJ. Concluiu o ensino fundamental em 1994, na Escola Municipal Nova Perequê, em Angra dos Reis/RJ. Em 1995 ingressou no curso de 2º grau no Colégio Estadual Roberto Montenegro, no mesmo município, tendo concluído em 1997. Em 1998 prestou vestibular para a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, tendo ingressado em 26/04/1999 no Curso de Agronomia. Em 2004 colou grau e ingressou no Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, em nível de Mestrado. Em 2005, em função de aprovação em concurso público, assumiu a vaga de Técnico de Recursos Hídricos no Instituto Estadual do Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo. No mesmo ano prestou concurso público para o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – Incra. Em 2006 concluiu o Mestrado em Ciência do Solo e assumiu a vaga de Engenheiro Agrônomo no Incra, em Cuiabá/MT, onde morou até 2011. Em 2017 ingressou no Doutorado no Programa de Pós-graduação em Agronomia – Ciência do Solo/UFRRJ, tendo defendido a Tese em 19/02/2020. Atualmente exerce o cargo de Engenheiro Agrônomo no Incra, lotado em Vila Velha/ES.

RESUMO GERAL

CRUZ, Eleandro Silva da. **Crescimento inicial de plantas de pimenta do reino: substratos, regimes de irrigação e biocontrole de *Fusarium* spp. com *Trichoderma* spp.** 2020. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

A escolha de substratos e técnicas de manejo adequados, podem ser decisivos para o sucesso ou o fracasso de cultivos em potes, como por exemplo em viveiros de mudas de pimenta do reino (*Piper nigrum* L.). Com o presente estudo objetivou-se avaliar características químicas e físicas de substratos, assim como o potencial de alguns destes na produção de mudas de pimenta do reino, submetidas a distintos regimes de irrigação (RI). Objetivou-se ainda avaliar o crescimento e a eficiência fotossintética deste tipo de planta, mediante o uso de produtos comerciais a base de *Trichoderma* spp., com ou sem infecção por *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, sob quatro RIs. Para isso, foram realizados três experimentos em datas distintas, todos em casa de vegetação, utilizando a cultivar Bragantina. No Experimento 1 (Capítulo I) foram caracterizados seis substratos obtidos pela mistura de bio sólido (BIO), vermicomposto (VC), fibra de coco triturada (FC) e pó de rocha granítica (PR), em diferentes proporções, e um substrato comercial a base de musgo esfagno e vermiculita (SC). Os substratos formulados apresentaram capacidade de retenção de água a 10 hPa até 70% inferior, em comparação com SC. O uso de BIO e PR contribui para a elevação da densidade de substratos produzidos. O substrato produzido com 75% de FC e 25% de VC (v/v) apresenta elevado espaço de aeração, e baixa capacidade de retenção de água. A mistura de 75% de BIO e 25% de PR (v/v), apresenta elevados teores biodisponíveis de P, Ca, Fe, Zn e Cu. No Experimento 2 (Capítulo II) foram testados três substratos [75% BIO + 25% FC (S1); 75% BIO + 25% PR (S2); e 50% BIO + 25% PR + 25% FC (S3)] e cinco RIs, referentes a 36, 54, 85, 100 e 126% da lâmina de irrigação de referência [LIR (S1 + RI 100)]. O substrato S1 apresenta restrições químicas, principalmente pH baixo, as quais, podem comprometer seu uso para a produção de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina. A produção de mudas destas plantas, com alturas iguais ou superiores a 20 cm e seis ou mais folhas, é possível com o uso de substrato S3, desde que o suprimento hídrico não seja inferior a 85% da necessidade hídrica das plantas. Restrição de até 15% da necessidade hídrica, não representam impactos negativos sobre a eficiência de uso da água por parte de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina. No Experimento 3 (Capítulo III), foram avaliadas plantas de pimenta do reino, cultivadas com o substrato S3. Aos 60 dias antes do transplântio os substratos foram tratados com produtos comerciais a base de *Trichoderma harzianum* (TH), *Trichoderma asperellum* (TA) ou *Trichoderma stromaticum* (TS), nas dosagens de $2,4 \times 10^4$, $1,79 \times 10^3$ e $4,56 \times 10^5$ UFC g⁻¹ substrato, respectivamente. As testemunhas consistiram na aplicação de fungicida sistêmico à base de Carbendazim (FG) ou água destilada (TT). A inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (FSP) foi realizada no momento do transplântio, mediante imersão das raízes em uma suspensão de esporos do fitopatógeno. As testemunhas tiveram as raízes imersas em água destilada (TF). Os RIs, foram equivalentes a 41, 59, 79 e 100% da LIR, aplicados via sistema de microirrigação automatizado. O aumento nos RIs proporciona elevação de comprimento da haste principal e acúmulo de matéria seca em plantas jovens de pimenta do reino. Os tratamentos TA e TS favorecem o crescimento de plantas jovens de pimenta do reino, enquanto TH afeta negativamente esse crescimento. A eficiência fotossintética de plantas jovens de pimenta do reino, cv. Bragantina, é negativamente afetada por infecção de *Fusarium solani* f.sp. *piperis* em estágio inicial, e por estresse hídrico leve.

Palavras chave: *Piper nigrum* L. Fusariose. Fluorescência da clorofila a. Manejo da irrigação.

GENERAL ABSTRACT

CRUZ, Eleandro Silva da. **Initial growth of black pepper plants: substrates, irrigation regimes and biocontrol of *Fusarium* spp. with *Trichoderma* spp.** 2020. 100p. Thesis (Doctor in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2020.

The choice of suitable substrates and management techniques can be decisive for the success or failure of cultivations in pots, such as in black pepper seedlings (*Piper nigrum* L.). This study aimed to evaluate chemical and physical characteristics of substrates, as well as the potential of some of these in the production of black pepper seedlings, submitted to different irrigation regimes (IR). The objective was also to evaluate the growth and photosynthetic efficiency of this type of plant, using commercial products based on *Trichoderma* spp., With or without infection by *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, under four IRs. For this, three experiments were carried out on different dates, all in a greenhouse, using the cultivar Bragantina. In Experiment 1 (Chapter I) six substrates obtained by mixing biosolid (BIO), vermicompost (VC), crushed coconut fiber (CF) and granite rock powder (GR), in different proportions, and a commercial substrate at sphagnum moss and vermiculite (CS) based. The formulated substrates showed water retention capacity at 10 hPa up to 70% lower, in comparison with CS. The use of BIO and GR contributes to increase the density of produced substrates. The substrate produced with 75% CF and 25% VC (v/v) has a high aeration space and low water retention capacity. The mixture of 75% BIO and 25% GR (v/v), presents high bioavailability levels of P, Ca, Fe, Zn and Cu. In Experiment 2 (Chapter II), three substrates were tested [75% BIO + 25% CF (S1); 75% BIO + 25% GR (S2); and 50% BIO + 25% GR + 25% CF (S3)] and five IRs, referring to 36, 54, 85, 100 and 126% of the reference irrigation depth [RID (S1 + 100% RID)]. The substrate S1 has chemical restrictions, mainly low pH, which can compromise its use for the production of black pepper seedlings, cv. Bragantina. The production of seedlings of these plants, with heights equal to or greater than 20 cm and six or more leaves, is possible with the use of S3 substrate, as long as the water supply is not less than 85% of the plants water requirement. Restriction of up to 15% of the water requirement, do not represent negative impacts on the efficiency of water use by black pepper seedlings, cv. Bragantina. In Experiment 3 (Chapter III), black pepper plants, cultivated with the substrate S3, were evaluated. At 60 days before transplantation, the substrates were treated with commercial products based on *Trichoderma harzianum* (TH), *Trichoderma asperellum* (TA) or *Trichoderma stromaticum* (TS), in the dosages of 2.4×10^4 , 1.79×10^3 and 4.56×10^5 UFC g⁻¹ substrate, respectively. The controls consisted of applying systemic fungicide based on Carbendazim (FG) or distilled water (TT). The inoculation with *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (FSP) was performed at the time of transplantation, by immersing the roots in a spore suspension of the phytopathogen, while distilled water was used on control (FT). The IRs were equivalent to 41, 59, 79 and 100% of the RID (TT + FT + 100% RID), and were applied via an automated microirrigation system. The increase in IRs increases the length of the main stem and the accumulation of dry matter in young black pepper plants. The TA and TS treatments favor the growth of young black pepper plants, while TH affects this growth negatively. The photosynthetic efficiency of young black pepper plants, cv. Bragantina, is negatively affected by infection of *Fusarium solani* f.sp. *piperis* at an early stage, and by mild water stress.

Keywords: *Piper nigrum* L. Fusariose. Chlorophyll fluorescence a. Irrigation management.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas pseudototais de materiais utilizados na composição dos substratos.	15
Tabela 2. Valores médios e desvio padrão de características físicas de substratos produzidos pela mistura de biossólido, fibra de coco triturada, vermicomposto e pó de rocha granítica.	21
Tabela 3. Valores médios e desvio padrão de disponibilidade de água de substrato comercial (SC) e substratos formulados com biossólido (BIO), fibra de coco triturada (FC), vermicomposto (VC) e pó de rocha granítica (PR).	24
Tabela 4. Média e desvio padrão de características químicas biodisponíveis (pH, CE e macronutrientes e micronutrientes) de substratos para plantas.....	26
Tabela 5. Valores médios e desvio padrão da concentração de hidrogênio extraível (H ⁺), alumínio trocável (Al ⁺³), acidez potencial (H ⁺ + Al ⁺³), soma de bases trocáveis (S), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC _e) e total (T), proporção da capacidade de troca catiônica preenchida por bases trocáveis (Valor V) e percentagem de saturação por alumínio (Sat. Al) e por sódio (Sat. Na) de substratos produzidos a partir da mistura de biossólido, fibra de coco triturada, vermicomposto e pó de rocha granítica.....	29
Tabela 6. Médias e desvio padrão de teores pseudototais de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) de substratos formulados com fibra de coco triturada, biossólido, vermicomposto e pó de rocha granítica.....	31
Tabela 7. Médias e desvio padrão de teores pseudototais de Pb e Cd de substratos formulados com fibra de coco triturada, biossólido, vermicomposto e pó de rocha granítica.	34
Tabela 8. Características químicas e físicas iniciais de substratos utilizados no cultivo de mudas de pimenta do reino.....	43
Tabela 9. Número de irrigações e volumes mensais acumulados de água aplicados em mudas de pimenta do reino, cultivadas em ambiente protegido, em função de diferentes regimes de irrigação (RI).....	49
Tabela 10. Valores médios e desvio padrão de comprimento da haste principal e massa seca de sistema radicular de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, submetidas a diferentes substratos.	53
Tabela 11. Valores médios e desvio padrão de características biométricas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, sob diferentes substratos e regimes de irrigação.	54
Tabela 12. Valores médios e desvio padrão de índices de clorofila a (CLa) e b (CLb) de mudas de pimenteira do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, em diferentes regimes de irrigação e substratos.	56
Tabela 13. Níveis de significância (Pr > Fc) de fatores sobre variáveis biométricas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, submetidas a diferentes tratamentos, aos 180 DAT.	73
Tabela 14. Valores médios de comprimento da haste principal (H), número de folhas (NF), massa fresca de caule (MFC) e massa seca de sistema radicular (MSR) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, submetidas a tratamentos com <i>Fusarium solani</i> f.sp. <i>piperis</i> e <i>Trichoderma</i> spp.	75
Tabela 15. Valores médios de comprimento da haste principal (H), massa fresca de folhas (MFF) e massa fresca de caule (MFC) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, inoculadas com <i>Trichoderma</i> spp., sob diferentes regimes de irrigação.....	77
Tabela 16. Modelos de regressão ajustados aos dados de comprimento da haste principal (H), massa fresca de folhas (MFF) e massa fresca de caule (MFC) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, em função de regimes de irrigação (RI) e aplicação de <i>Trichoderma</i> spp.	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema representativo da relação entre os parâmetros do teste JIP e a sequência de processos, durante a indução da fotossíntese.....	9
Figura 2. Visão geral do dispositivo para a determinação de densidades úmida e seca dos substratos pelo método da autocompactação..	16
Figura 3. Frações granulométricas acumuladas de substratos produzidos com uso de fibra de coco triturada (FC), biossólido (BIO), vermicomposto (VC) e pó de rocha granítica (PR).	22
Figura 4. Curvas de retenção de água calculadas pelo método da mesa de tensão de substrato comercial (SC) e substratos produzidos a partir da mistura de biossólido (BIO), fibra de coco triturada (FC), vermicomposto (VC) e pó de rocha granítica (PR). θ – umidade volumétrica.	23
Figura 5. Esquema de funcionamento do acionador simplificado de irrigação	44
Figura 6. Valores médios diários de: A - Temperatura máxima (---), média (—) e mínima (---); e B - Umidade relativa do ar (—). Valores diários acumulados de: C - radiação solar (—); e D - Radiação fotossinteticamente ativa [RFA (—)], registrados no interior da casa de vegetação durante o período experimental.....	46
Figura 7. Valores observados e estimados de área foliar de plantas de pimento do reino, cv. Bragantina.....	47
Figura 8. Volume de água acumulado, aplicado em plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, conforme regimes de irrigação equivalentes a 36% (RI 36), 54% (RI 54), 85% (RI 85), 100% (RI 100) e 126% (RI 126) da lâmina de irrigação de referência.....	49
Figura 9. Comprimento da haste principal de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 38, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias após o transplântio, em função de diferentes regimes de irrigação (colunas) e substratos isentos (linhas)..	50
Figura 10. Índice de área foliar de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 38, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias após o transplântio, em função de diferentes regimes de irrigação (colunas) e substratos isentos (linhas)..	51
Figura 11. Análise de regressão de comprimento da haste principal (H) e massa seca de parte aérea (MSPA) de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, em função de regimes de irrigação (RI)..	52
Figura 12. Análise de regressão de índice de área foliar (A) e número de folhas (B) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT submetidas a diferentes substratos e regimes de irrigação.....	54
Figura 13. Análise de regressão de índice de clorofila a (A) e clorofila b (B) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, sob diferentes substratos e regimes de irrigação (RI).....	55
Figura 14. Análise de regressão de eficiência no uso da água (EUA) de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, em função dos regimes de irrigação (RI).....	57
Figura 15. Aplicação de produtos comerciais à base de <i>Trichoderma</i> spp. em substrato para a produção de mudas de pimenta do reino.	65
Figura 16. Esquema de ligação dos dispositivos ASI utilizados até 90 DAT (A) e sensores eletrônicos baseados em placas de prototipagem Arduino utilizados de 91 a 180 DAT (B).	67
Figura 17. Valores diários de temperatura média (Tmed), mínima (Tmin) e máxima (Tmax) (A) e umidade relativa do ar média (B), registrados no interior da casa de vegetação durante o período de avaliação.	68

Figura 18. Radiação solar total diária registrada no interior da casa de vegetação durante o período experimental.	68
Figura 19. Folhas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, com sintomas de antracnose causada por <i>Colletotricum gloeosporioides</i>	69
Figura 20. Volume acumulado de água, aplicado em plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, conforme regimes de irrigação equivalentes a 41% (RI 41), 59% (RI 59), 79% (RI 79) e 100% (RI 100) da lâmina de irrigação de referência.....	71
Figura 21. Curvas de crescimento (altura média) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, sob diferentes regimes de irrigação, aos 0, 30, 60, 80, 100, 130, 160, 170 e 180 dias após o transplantio (DAT).....	72
Figura 22. Índice de clorofila a (A) e clorofila b (B) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 30, 60, 80, 100, 130, 160, 170 e 180 DAT.....	72
Figura 23. Coeficientes de correlação linear de Pearson de variáveis biométricas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT.....	73
Figura 24. Regressão linear de massa seca de folhas (MSF), caule (MSC) e sistema radicular (MSR) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, em função de regimes de irrigação (RI). * Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.....	74
Figura 25. Análise de regressão área foliar [AF (A)] e número de folhas [NF (B)] de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, em função de regimes de irrigação...	75
Figura 26. Análise de regressão para comprimento da haste principal [H (A)], massa fresca de folhas [MFF (B)] e massa fresca de caule [MFC (C)] de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, em função de regimes de irrigação (RI) e aplicação de <i>Trichoderma</i> spp. (■) Testemunha (fungicida sistêmico); (□) <i>Trichoderma asperellum</i> ; (●) <i>Trichoderma harzianum</i> ; (○) <i>Trichoderma stromaticum</i> ; e (Δ) Testemunha (água destilada).	78
Figura 27. Valores médios e intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$) de comprimento da haste principal (H) e índices de clorofila ¹ a (CLa) e b (CLb) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 160, 170 e 180 DAT.....	79
Figura 28. Transiente da fluorescência da clorofila a de folhas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, adaptadas ao escuro, aos 160 (A), 170 (B) e 180 (C) dias após o transplantio, inoculadas com <i>Fusarium solani</i> f.sp. <i>piperis</i> e submetidas a diferentes regimes de irrigação (RI).....	81
Figura 29. Diferença cinética OJIP da fluorescência da clorofila a (Banda L) de folhas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, adaptadas ao escuro, aos 160 (A e D), 170 (B e E) e 180 DAT (C e F).....	82
Figura 30. Diferença cinética OJIP da fluorescência da clorofila a (Banda K) de folhas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, adaptadas ao escuro, aos 160 (A e D), 170 (B e E) e 180 DAT (C e F).....	84
Figura 31. Parâmetros biofísicos de fluxo de energia, produtividade, eficiência e índices de performance, derivados de parâmetros básicos do teste JIP, de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 160 DAT, inoculadas com <i>Fusarium solani</i> f.sp. <i>piperis</i> (A) e não inoculadas (B), sob diferentes regimes de irrigação (RI)..	85
Figura 32. Parâmetros biofísicos de fluxo de energia, produtividade, eficiência e índices de performance, derivados de parâmetros básicos do teste JIP, de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 170 DAT, inoculadas com <i>Fusarium solani</i> f.sp. <i>piperis</i> (A) e não inoculadas (B), sob diferentes regimes de irrigação (RI).	86
Figura 33. Parâmetros biofísicos de fluxo de energia, produtividade, eficiência e índices de performance, derivados de parâmetros básicos do teste JIP, de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, inoculadas com <i>Fusarium solani</i> f.sp. <i>piperis</i> (A) e não inoculadas (B), sob diferentes regimes de irrigação (RI)..	87

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REVISÃO DE LITERATURA GERAL	3
2.1 A Cultura da Pimenta do Reino	3
2.2 Substrato para Plantas	4
2.3 Irrigação em Pimenta do Reino.....	7
2.4 Avaliação de Estresse de Plantas por Meio da Fluorescência da Clorofila a.....	8
3 CAPÍTULO I CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DE SUBSTRATOS PARA PLANTAS	11
3.1 RESUMO	12
3.2 ABSTRACT	13
3.3 INTRODUÇÃO	14
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
3.5.1 Características Físicas	21
3.5.2 Características Químicas.....	25
3.6 CONCLUSÕES	36
4 CAPÍTULO II CRESCIMENTO DE PLANTAS DE PIMENTA DO REINO, CV. BRAGANTINA, SOB DIFERENTES REGIMES DE IRRIGAÇÃO E SUBSTRATOS	37
4.1 RESUMO	38
4.2 ABSTRACT	39
4.3 INTRODUÇÃO	40
4.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	42
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.6 CONCLUSÕES	59
5 CAPÍTULO III EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E CRESCIMENTO DE PLANTAS DE PIMENTA DO REINO SOB ESTRESSES BIÓTICO E ABIÓTICO....	60
5.1 RESUMO	61
5.2 ABSTRACT	62
5.3 INTRODUÇÃO	63
5.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	64
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.5.1 Análise de Crescimento.....	71
5.5.2 Análise do Transiente OJIP da Fluorescência da Clorofila a.....	79
5.6 CONCLUSÕES	89
6 CONCLUSÕES GERAIS	90
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 INTRODUÇÃO GERAL

A pimenta do reino (*Piper nigrum* L.), também conhecida como pimenta negra, é uma trepadeira pertencente à família *Piperaceae*, amplamente empregada na indústria de cosméticos, alimentícia e na medicina (TAKOORE et al., 2019), o que justifica sua importância como produto de exportação. A produção brasileira está entre as cinco mais importantes do mundo (FAO, 2019) e se concentra nos estados do Espírito Santo e Pará, que participam com aproximadamente 95% do total produzido. No Espírito Santo, a maior parte dos cultivos localiza-se na porção Norte do estado, principalmente em São Mateus, Jaguaré e Vila Valério (IBGE, 2019). Conforme dados disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP, mantido pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, entre 1971 e 2019, na estação meteorológica de São Mateus (83550) foram registradas temperaturas médias anuais de 24,2°C, déficit hídrico médio de 277 mm, com chuvas concentradas no período outubro/abril, período em que ocorre cerca de 77% do total precipitado ao ano (1.216,6 mm) (INMET, 2020).

Trata-se de uma cultura sensível ao estresse hídrico, sobretudo nas fases de estabelecimento, floração e enchimento das espigas (KRISHNAMURTHY et al., 2016), requerendo assim, estudos acerca da sua demanda hídrica sob condições brasileiras. Neste sentido, o manejo da irrigação deve ser adequado às condições de disponibilidade hídrica, de tal forma a proporcionar a produção de plantas com qualidade aceitável pelo mercado consumidor, porém com menor consumo de água possível, haja vista ser este um recurso natural não renovável, cada vez mais valorizado, tendo em vista sua degradação em função de diversas ações humanas.

A fusariose (ALBUQUERQUE e FERRAZ, 1976), causada pelo fungo de solo *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, é a principal doença da cultura da pimenta do reino no Brasil, sendo restrita ao território nacional, para a qual não existe controle químico eficaz ou cultivar resistente registrada no Brasil (BENCHIMOL et al., 2017; CASTRO et al., 2016; ROCHA et al., 2016). Portanto, ações preventivas de controle são recomendadas, sendo a principal delas a utilização de mudas isentas do fitopatógeno no estabelecimento de novos plantios (VENTURA e COSTA, 2004).

O agente causal da fusariose possui capacidade de sobrevivência em restos culturais e de produção de estruturas de resistência no solo (SUMMERELL e LESLIE, 2011), e por isso deve-se evitar o uso de solo na composição de substratos para a produção de mudas de pimenta do reino. A presença do patógeno nas mudas dará origem à pimentais igualmente infectados, os quais poderão ter sua vida útil reduzida de mais de 12 para menos que seis anos, comprometendo assim a competitividade da atividade (TREMACOLDI, 2010).

Os substratos para plantas não devem ser escolhidos com base apenas nas suas características químicas e físicas (SANTOS et al., 2014; SCHINDLER e MÜLLER, 2017), mas também nos custos dos materiais constituintes e na sua disponibilidade na região produtora, sob pena de inviabilizar economicamente seu uso. Neste aspecto, diversos tipos de materiais alternativos têm sido empregados como componentes, como resíduos agroindustriais (FERMINO et al., 2018; KRAUSE et al., 2017), lodo de esgoto, também conhecido como biossólido quando estabilizado (ABREU et al., 2017b; SANTOS et al., 2014; SCHEER et al., 2013) e pó de rocha granítica (PARADELO et al., 2016; SAMPAIO et al., 2008).

O Brasil é o quinto maior produtor de rochas ornamentais e o estado do Espírito Santo o maior produtor nacional (ABIROCHAS, 2019), com cerca de 74% do total exportado pelo Brasil em 2019 (MDIC, 2019). Desta forma, embora não existam dados oficiais acerca do assunto, é provável que seja também um dos maiores geradores de pó de rocha, que pode causar

importantes danos ambientais, caso não seja adequadamente disposto na natureza (MANHÃES e HOLANDA, 2008). Mesmo assim, poucos são os trabalhos que correlacionam o uso deste tipo de material como constituinte de substratos para a produção de mudas de pimenta do reino no Brasil.

Tanto as já existentes como as novas tecnologias de cultivo e de análise de crescimento de plantas devem ser continuamente avaliadas, no primeiro caso para aumento de eficiência e, no segundo, para validação, antes da utilização pelos agricultores. Para isso, além da observação direta do desenvolvimento das plantas, deve-se assegurar da ocorrência ou não de estresse, em função de algum parâmetro biótico ou abiótico. Nesta linha, a análise da fluorescência da clorofila *a* tem sido amplamente utilizada como um indicador de vitalidade das plantas, sendo vantajoso por ser uma técnica não destrutiva, de rápida obtenção, e que apresenta sensibilidade para todos os fatores que, de alguma maneira, interferem no aparato fotossintético das plantas.

Face ao exposto, o objetivo geral do presente trabalho foi avaliar o desenvolvimento inicial de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, sob diversos regimes de irrigação e tipos de substratos, aplicação de *Trichoderma* spp. e inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*. Para isso, o trabalho foi estruturado em três capítulos: no primeiro objetivou-se avaliar substratos isentos de solo, quanto às suas características físicas e químicas; no segundo, avaliar o desenvolvimento vegetativo de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, submetidas a diferentes regimes de irrigação e substratos isentos de solo; por fim, no terceiro capítulo, o objetivo foi avaliar o desenvolvimento vegetativo e a eficiência fotossintética de plantas de pimenta do reino, submetidas a diferentes regimes de irrigação, aplicação de produtos comerciais a base de *Trichoderma* spp. e inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*.

2 REVISÃO DE LITERATURA GERAL

2.1 A Cultura da Pimenta do Reino

A pimenta do reino (*Piper nigrum* L.), também conhecida como pimenta negra, é uma trepadeira pertencente à família *Piperaceae*, adaptada a condições de clima subtropical úmido, a qual se desenvolve bem em ambientes sombreados (KRISHNAMURTHY et al., 2016; ZU et al., 2016). Seu fruto, parte da planta dotada de valor econômico, é um produto de importância para o comércio mundial por ser utilizado com fins condimentares, bem como para a produção de extratos os quais apresentam importantes propriedades antimicrobianas, além de serem ingredientes seguros para o desenvolvimento de novos produtos farmacêuticos (TAKOORE et al., 2019). A piperina, seu principal princípio ativo, apresenta potencial como suplemento dietético, podendo ser associado a abordagens terapêuticas para o tratamento de diversas doenças pela biomedicina (SHITYAKOV et al., 2019).

Em 2017 a produção brasileira de pimenta do reino foi a terceira maior no mundo, sendo superada por Indonésia e Vietnã (FAO, 2019). Neste mesmo ano foram produzidas 46.899 Mg de pimenta do reino no Brasil, colhidas em 35.705 hectares de lavouras distribuídos por 32.799 estabelecimentos agropecuários. Aproximadamente 80% da produção nacional é comercializada com outros países, principalmente Estados Unidos e Alemanha (BRASIL, 2019), caracterizando a cultura como importante commodity, dotada de apelo social, tendo em vista que a maior parte dos plantios comerciais estão situados em pequenas propriedades, que geralmente são de base familiar (SERRANO; LIMA e MARTINS, 2006).

A produção nacional é concentrada nos estados do Pará e Espírito Santo, que correspondem a 48,5 e 45,8%, respectivamente, do total produzido no país (IBGE, 2019). Os cinco municípios brasileiros com as maiores produções em 2017 foram São Mateus/ES (9.268 Mg), Tomé-Açu/PA (3.314 Mg), Jaguaré/ES (3.223 Mg), Acará/PA (2.405 Mg) e Capitão Poço/PA (1.940 Mg), os quais concentraram cerca de 43% do total produzido (IBGE, 2019). Com base nesta distribuição, é possível notar que a pipericultura nacional é praticada em pelo menos dois ambientes distintos. O primeiro está localizado na mesorregião do Nordeste Paraense, onde há predomínio de uma estação chuvosa, que vai de dezembro a maio, quando ocorrem precipitações médias de 1.766 mm, seguida de uma estação menos chuvosa, que dura de junho a novembro, com 539 mm de precipitação em média (MORAES et al., 2005). O segundo é restrito à região Norte do Espírito Santo, principalmente São Mateus, Jaguaré e Vila Valério (IBGE, 2019). Conforme dados disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP, mantido pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, entre 1971 e 2019, na estação meteorológica de São Mateus (83550) foram registradas temperaturas médias anuais de 24,2°C, déficit hídrico médio de 277 mm, com chuvas concentradas no período outubro/abril, período em que ocorre cerca de 77% do total precipitado ao ano (1.216,6 mm) (INMET, 2020).

A cultura, no entanto, é considerada sensível ao estresse hídrico, sobretudo nas fases de estabelecimento, floração e enchimento das espigas (KRISHNAMURTHY et al., 2016), sendo, portanto, necessários estudos acerca da demanda hídrica destas plantas sob condições de cultivo encontradas no Brasil, com má distribuição dos períodos chuvosos ao longo do ano.

No Brasil, as doenças mais importantes da cultura são causadas por fungos, destacando-se a podridão das raízes, também conhecida como Fusariose, causada por *Fusarium solani* f.sp. *piperis*; murcha amarela, causada por *Fusarium oxysporum*; queima do fio, causada por *Koleroga noxia*; e antracnose, causada por *Colletotrichum gloesporioides* (TREMACOLDI, 2010). Dentre estas, a de maior potencial destruidor é a Fusariose (ROCHA et al., 2016; SERRANO et al., 2012; TREMACOLDI, 2010; VENTURA e COSTA, 2004), tendo em vista que um pimental infectado pode ser completamente destruído em até cinco anos, reduzindo a

vida útil de um pimental em até sete anos, não existindo controle químico eficaz ou cultivar resistente no Brasil. Esta doença é a principal causa da queda histórica das produções Paraenses (KATO et al., 2000), com prejuízos financeiros estimados em 10 milhões de dólares ao ano, pela redução em uma taxa de 3% ao ano em áreas de produção (TREMACOLDI, 2010).

O ataque ao sistema radicular é a forma de infecção mais importante, quando há o crescimento das colônias no sentido ascendente no interior dos vasos condutores, com interrupção do fluxo de seiva, acarretando redução gradativa da vitalidade das plantas e posterior morte precoce das plantas atacadas (TREMACOLDI, 2010; SERRANO et al., 2006).

Mudas comerciais de pimenteira-do-reino são geralmente produzidas de forma assexuada, por meio de técnicas de estaquia, alporquia ou garfagem (BHUYAN et al., 2015), em substratos de natureza diversa (SERRANO et al., 2012), o que é apontado por Freire (2017), como um dos grandes problemas na produção de mudas por viveiros comerciais.

De acordo com informações disponíveis no portal do Registro Nacional de Sementes e Mudanças - RENASEM (MAPA, 2016), atualmente no Brasil existem 385 viveiros credenciados para a produção de mudas de *Piper nigrum* L., sendo que destes, cerca de 47,3% estão localizados no ES, 14,5% em MG, 12,5% em SP, 8,3% no PA, 3,9% na BA e os 13,5% restantes distribuídos por outras 15 unidades federativas. Estes substratos, porém, podem conter propágulos de vetores de diversos fitopatógenos (PRASATH et al., 2014; THANKAMAN et al., 2008), podendo originar plantas já infectadas por *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, por exemplo, cujo ciclo produtivo pode ser encurtado em até 75% (TREMACOLDI, 2010).

Serrano et al. (2012) comentam que o fator de maior preocupação dos pipeicultores capixabas e paraenses é a morte precoce da pimenteira, causada pelo fungo de solo *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, uma vez que não existe variedade resistente a este patógeno no Brasil. Ventura e Costa (2004) apontam que uma das principais medidas de manejo desta doença é a utilização de mudas livres do patógeno na formação ou renovação de um pimental.

2.2 Substrato para Plantas

As principais características físicas de um substrato para plantas são densidade volumétrica, porosidade total, capacidade de aeração e disponibilidade de água (BUNT, 1973). A escolha de um substrato deve levar em consideração diversos parâmetros, dependendo da cultura e do tipo de cultivo adotados. Se a intenção é a produção de mudas que serão transportadas para grandes distâncias, por exemplo, seria mais recomendada a utilização de substratos com baixa densidade e alta capacidade de retenção de água. No entanto, se a cultura possuir parte aérea alta e o cultivo ocorrer em locais com suscetibilidade a ventos, substratos com maior densidade são mais recomendados, haja vista que as plantas podem tombar pela falta de sustentação. Da mesma forma, se em determinado cultivo se utilizar o método de irrigação por inundação, os recipientes de cultivo podem flutuar com a elevação do nível da água, caso seja empregado substrato pouco denso, prejudicando a aplicabilidade do método.

A utilização de substrato com adição de solo mineral pode ser considerada desvantajosa dependendo da situação, uma vez que resulta em substratos mais densos, quando comparados a outros materiais, fazendo com que os custos de transporte das mudas do viveiro até o local de plantio sejam majorados. Dependendo do volume de substrato produzido, a extração de solo pode ocasionar danos ambientais e econômicos, em função da retirada da vegetação e remoção de camadas férteis do solo. O uso de solo pode aumentar o risco de introdução de inóculos de fitopatógenos em estandes de produção de mudas, propiciando a dispersão de doenças para novas áreas, onde, eventualmente, a mesma ainda não esteja presente. Cada vez mais, viveiristas tem optado pela utilização de substratos em pequenos volumes e de menor densidade, devido a possibilidade de se trabalhar com as mudas em bancadas, facilitando o trabalho em termos de ergonomia, manejo das mudas e preparação para o transporte.

Desta forma, a busca por tecnologias alternativas para a formulação de substratos para a produção de mudas tem sido foco de diversas pesquisas (ABREU et al., 2017b; PARADELO et al., 2016; PRASATH et al., 2014). A utilização de materiais provenientes de rejeitos de processos industriais pode ser alternativa para a redução da contaminação ambiental, haja vista que é evitado o descarte dos mesmos no meio ambiente. Além do benefício ecológico, esse tipo de solução é capaz ainda de reduzir custos de produção de atividades industriais, em função da redução de custos de transporte e de deposição de rejeitos.

Nessa linha, o aproveitamento de resíduos gerados na propriedade apresenta ainda mais benefícios para o produtor, já que nem mesmo o pagamento do custo do transporte entre o local de produção e de uso do resíduo seria necessário, sendo possível a utilização de praticamente qualquer fonte de material orgânico, como por exemplo massa vegetal removida através de poda, resíduos agroindustriais, etc. No entanto, em alguns casos, torna-se necessária a estabilização desse material, antes de sua utilização.

Compostagem pode ser definida como um processo controlado nos quais materiais orgânicos são digeridos aeróbica e anaerobicamente por ação de microorganismos (FAO, 2020). Neste processo, existe a possibilidade de utilização de resíduos orgânicos de diversas fontes, os quais podem ser utilizados na agricultura sob a forma de composto, entretanto, nem todos os materiais apresentam aptidão para passar pelos processos da compostagem de forma adequada. Dentre os riscos gerados quando isto ocorre estão: fitotoxicidade, bloqueio biológico do nitrogênio, redução de oxigenação radicular e excesso de amônio (ROMÁN; MARTÍNEZ e PANTOJA, 2013).

Quando a compostagem é realizada com uso de minhoca e microorganismos, que são os responsáveis pela estabilização da matéria orgânica, o resultado final recebe o nome de vermicomposto (ROMÁN; MARTÍNEZ e PANTOJA, 2013), o qual é obtido em menos tempo, se comparado com o processo de compostagem (CHAUDHARY; BHANDARI e SHUKLA, 2004). Estes materiais são capazes de manter e melhorar a qualidade do solo, apresentando boa qualidade em termos nutricionais, o que leva a redução do requerimento de fertilizantes, além de poder ser utilizado como substrato para plantas cultivadas em recipientes (CHAUDHARY; BHANDARI e SHUKLA, 2004).

A utilização de fibra de coco como substratos para plantas representou um grande avanço nesse sentido, pois trata-se de um subproduto do beneficiamento do coco seco, que começou a ser utilizado em substituição ao xaxim no cultivo de plantas de jardim e bromélias. Com isso, ao mesmo tempo em que proporcionou a redução na pressão de exploração da Samambaia Açú Imperial (*Dicksonia sellowiana*) - espécie ameaçada de extinção -, tornou-se uma fonte extra de renda para a indústria de beneficiamento do coco, considerando que a fibra retirada da casca de coco passou a ter valor econômico. Outro exemplo de material alternativo utilizado na agricultura é o lodo produzido no processo de tratamento de esgoto, que uma vez processado e tratado, recebe o nome de biossólido. Este material tem sido avaliado com sucesso na produção de mudas de espécies florestais (ABREU et al., 2017; SANTOS et al., 2014; TRAZZI et al., 2014) em função de sua elevada taxa de nutrientes disponíveis e altos teores de matéria orgânica.

Conhecido como lama abrasiva, um subproduto oriundo do beneficiamento de rochas ornamentais, o pó de rocha granítica, um resíduo com elevados teores de cálcio e ferro, é outra alternativa para constituição de substrato de plantas e tem sido estudado por diversos autores. Paradelo et al. (2016) constataram que, desde que adequadamente em mistura com materiais orgânicos e corrigido o pH, substratos contendo pó de rocha granítica promovem o adequado crescimento de plantas de *Lolium perenne* em casa de vegetação. Os autores comentam ainda que devido às suas características físicas, o pó de rocha granítica tem potencial para substituir a areia na formulação de substratos para plantas, com a vantagem de ainda ser capaz de fornecer alguns nutrientes para plantas sob formas assimiláveis, como por exemplo Fe, Ca, Mg, e K, a

curto ou a médio prazo, o que já haviam constatado reforçado por Silva et al., (2005) e Coroneos et al. (1995).

Thankamani et al., 2007 verificaram que substratos formulados com utilização de pó de rocha granítica permitiram o desenvolvimento satisfatório de mudas de pimenta do reino, obtidas a partir de processo de estaquia, sendo que o meio de cultivo composto por pó de rocha granítica e fibra de coco na proporção 1:1, enriquecido com *Azospirillum* spp. e fosfobactérias, como fontes de nutrientes, proporcionaram maiores valores de altura de plantas, produção de folhas, área foliar e teores de matéria seca, em comparação com outros substratos.

Os mesmos autores avaliaram ainda o desempenho de diferentes combinações de casca de coco decomposta por *Pleurotus* spp. e pó de rocha granítica como meio de enraizamento de estacas de pimenteira-do-reino, variedade Sreekara na Índia, e verificaram que uma das misturas permitiu a produção de mudas com características agrônômicas satisfatórias. Em estudo semelhante, Prasath et al. (2014) verificaram que um substrato formulado a partir da mistura de fibra de coco moída e vermicomposto, enriquecido com *Trichoderma* spp., mostrou-se um excelente meio de produção de mudas de pimenta do reino.

O biossólido, obtido pelo processo de estabilização do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto, é um resíduo para o qual inexistem dados oficiais acerca de sua disposição final no Brasil. No entanto, trata-se de um material com potencial para utilização na produção vegetal, com ênfase no uso agrícola, conforme apontou a análise das pesquisas produzidas entre 2004 e 2014 (CASTRO; SILVA e SCALIZE, 2015). De acordo com a legislação brasileira seu uso é vedado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes e demais culturas, cuja parte comestível entre em contato como solo, e ainda em cultivos inundáveis (CONAMA, 2006).

Atualmente a grande demanda por substratos hortícolas está baseada em sistemas de cultivo protegido em vasos ou em bandejas de germinação. De toda forma, é imperativa a aplicação de água via sistema de irrigação nesses tipos de cultivos, o que deve ser feito de maneira racional e eficiente (CARVALHO & OLIVEIRA, 2012), visando evitar o desperdício de água, um bem finito, dotado de valor econômico. Assim, é de se supor que o sucesso de um empreendimento agrícola desse tipo também passe pelo conhecimento das características hidráulicas dos substratos utilizados, devendo tais características também serem consideradas como indicadoras da qualidade de substratos para plantas (FIELDS et al., 2016).

Estudos conduzidos por Schindler e Müller (2017) demonstraram grande variabilidade de comportamento hidráulico entre 36 substratos comerciais, principalmente no que se refere aos volumes de poros ocupados por ar e água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, a água facilmente disponível em potes de 20 cm de altura, ao encolhimento da superfície da superfície do substrato após secagem e a repelência de água. Entretanto, torna-se necessário o estabelecimento de critérios objetivos de avaliação de substratos, com metodologias de análises padronizadas e reproduzíveis, para fins de comparação produtos de diferentes naturezas.

Schindler e Müller (2017) propuseram uma escala de notas para substratos hortícolas, baseada em cinco parâmetros: 1) água facilmente disponível para as plantas; 2) aeração; 3) ascensão capilar; 4) tempo de penetração de gota de água (hidrofobia); e 5) encolhimento superficial. De acordo com este método, aos substratos devem ser atribuídas notas conforme os resultados dos testes, gerando uma escala de avaliação, que pode variar de muito bom a não satisfatório, passando por mais três outras classes intermediárias. Estudos deste tipo são importantes não apenas para a classificação de substratos, mas principalmente para a adoção de técnicas visando a otimização do uso da água em sistemas de cultivo protegido e fora do solo. Porém, a literatura referente a este tipo de informação ainda é relativamente escassa, o que justifica a realização de ensaios com esta finalidade.

2.3 Irrigação em Pimenta do Reino

A ocorrência de estresse hídrico durante o período compreendido entre o florescimento e o desenvolvimento das bagas da pimenteira-do-reino afeta severamente a sua produtividade, já durante os estágios iniciais, o estresse hídrico afeta fortemente o desenvolvimento da área foliar e alongamento das folhas (SIVARAMAN et al., 1999). Os autores afirmam ainda que o balanço fotossintético e de transpiração das plantas de pimenta do reino são reduzidos severamente sob estresse hídrico.

Portanto, seja para o atendimento das necessidades da cultura, seja para a melhoria do desempenho de microrganismos de solo, o manejo da irrigação torna-se ferramenta importante na piveicultura nacional e ainda carece de pesquisas sobre o tema.

Para isso, é desejável, dentre outras coisas, a realização de um planejamento correto e de um manejo adequado da água na irrigação, objetivando seu uso responsável, sustentável e racional (CARVALHO e OLIVEIRA, 2012).

De acordo com esses autores, o uso racional da água em sistemas agrícolas implica no suprimento hídrico às plantas na medida mais adequada, ou seja, o mais próximo possível da real necessidade das plantas, fazendo-o de tal forma a aplicar a lâmina de irrigação em momentos distintos daqueles em que as plantas talvez não estejam aptas a captar água no solo. O manejo da água para irrigação pode ser realizado de diversas maneiras, podendo-se citar: o manejo baseado em dados climáticos, no balanço de água no solo e em informações da planta.

Uma das vantagens do manejo automatizado da irrigação é capacidade de redução de mão de obra, entretanto tais tecnologias tendem a apresentar custos elevados, tornando-a restrita a situações em que a cultura irrigada seja de alto valor econômico, por exemplo. Nesse contexto, Medici et al. (2010) desenvolveram um acionador automático para irrigação de baixo custo, o qual pode ser confeccionado a partir de materiais de baixo custo, facilmente encontrado no comércio tradicional. Os autores concluíram que esse tipo de dispositivo pode ser útil para o cultivo de plantas de forma geral, sendo possível, mediante seu uso, a aplicação automática de água, em função da tensão com que a mesma esteja retida no substrato onde as plantas são cultivadas.

A aplicação dessa tecnologia na produção agrícola pode representar importante medida em situações de escassez hídrica, já que tende a otimizar o uso da água, em detrimento a outros tipos de manejo. Um exemplo desse tipo de situação ocorreu no Estado do Espírito Santo em 2015, quando o Governo estadual decretou “Cenário de Alerta”, por meio da Resolução AGERH nº05/2015, em função do prolongamento da escassez hídrica em rios de seu domínio. De acordo com tal medida, a captação de água para fins de irrigação ficou restrita ao período noturno, sendo determinado que instituições de fomento e crédito suspendessem, por tempo indeterminado, financiamentos que previssessem a implantação de novos sistemas de irrigação, ou mesmo a ampliação daqueles já existentes. No caso dos sistemas existentes, os créditos oficiais poderiam ser empregados na troca por sistemas de irrigação de maior eficiência no uso da água.

Como forma de fomentar a cultura da racionalização do uso da água entre os agricultores capixabas, o Governo do Estado do Espírito Santo instituiu, através da Portaria Conjunta SEAMA/SEAG nº06-R, de 07 de junho de 2016, o “Certificado de Sustentabilidade Quanto ao Uso da Água na Irrigação”, o qual foi aplicado facultativamente a todos os usuários de água para fins de irrigação no âmbito estadual, que utilizassem sistemas de irrigação compatíveis com o uso racional e adequado da água em suas lavouras.

Vale destacar que o Espírito Santo é o segundo maior produtor de pimenta do reino do Brasil, conforme já foi apresentado anteriormente, e que conforme plano estratégico do estado do Espírito Santo (ESPÍRITO SANTO, 2008), a piveicultura capixaba é mais desenvolvida na região norte do estado, região esta que apresenta menor disponibilidade hídrica, em comparação com outras regiões produtoras.

2.4 Avaliação de Estresse de Plantas por Meio da Fluorescência da Clorofila a

As plantas necessitam de algumas condições primordiais para o seu adequado funcionamento, podendo-se citar: (i) fonte de energia, geralmente a luz solar; (ii) água; e (iii) elementos (nutrientes) para a formação de seus produtos. Assim, o desbalanço em qualquer dessas condições provoca reações nas plantas, as quais podem variar de intensidade, conforme a interação dessas plantas com o ambiente.

Nesse sentido, ambientes agrícolas são normalmente estressantes para plantas (ALTIERI e NICHOLLS, 2004). Condições ambientais adversas, como seca, alta salinidade do solo e temperaturas extremas, são importantes fatores de estresses abióticos, causando severa perda de rendimento para as culturas agrícolas, sendo a principal causa de perdas de colheitas em todo o mundo (KRISHNAMURTHY et al., 2016). Da mesma forma, perdas de produções por fatores bióticos são igualmente importantes. Estima-se que a perda potencial global devido a pragas seja de cerca de 50% na cultura do trigo, ultrapassando 80% na produção de algodão, sendo que, de modo geral, plantas daninhas possuem maior potencial de causar perdas (34%), enquanto o potencial de pragas, patógenos e animais está entre 18 e 16% (OERKE, 2006). Assim, tornou-se importante diagnosticar condições de estresse de plantas, a partir de suas respostas de forma rápida e prática.

A fotossíntese envolve processos de conversão de energia luminosa em energia química, utilizando dois fotossistemas e enzimas para a oxidação da água à oxigênio molecular e redução de dióxido de carbono a carboidrato. Neste processo, a energia luminosa absorvida por pigmentos fotossintéticos pode ser perdida sob a forma de calor, por processos internos, ou sob a forma de emissão luminosa, principalmente fluorescência (STIRBET et al., 2018; TAIZ et al., 2017).

O aparato fotossintético das plantas, em especial o fotossistema II (FSII), é sensível e necessita suplantar as constantes mudanças no meio ambiente, para a manutenção do seu funcionamento de forma otimizada. Neste sentido, técnicas de análise da fluorescência da clorofila a (FCI) são úteis e permitem o monitoramento de alterações nas plantas, de forma simples, não destrutiva e rápida (TSIMILLI-MICHAEL e STRASSER, 2008).

Os parâmetros estruturais e funcionais do FSII, avaliados pela análise dos transientes de fluorescência, conjugado com o teste JIP (STRASSER; SRIVASTAVA e GOVINDJEE, 1995) fornecem uma quantificação de três componentes inter-relacionados, presentes na condição de vitalidade das plantas: atividade, adaptabilidade e estabilidade (TSIMILLI-MICHAEL e STRASSER, 2008).

O teste JIP é uma análise multiparamétrica da rápida elevação da fluorescência JIP, baseada no princípio de que, sob escuro, a quinona primária (Q_A), um acceptor de elétron do FSII, é oxidada [quando todos os centros de reação (RC) estão abertos] e a intensidade da fluorescência no início da iluminação (origem - O) é mínima (F_0). O rápido aumento da fluorescência, induzido pela luz actínica reflete o fechamento dos RC's (redução da Q_A). Sob forte luz actínica (p.ex. 3000 μmol de fótons por $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a intensidade de fluorescência F_p (no pico P) é igual a máxima fluorescência, F_M , quando toda Q_A é reduzida (todos os RC's estão fechados) (STRASSER; TSIMILLI-MICHAEL e SRIVASTAVA, 2004). Essa sequência de eventos reflete a elevação da fluorescência com diferentes taxas, sendo, portanto, polifásica (STRASSER; SRIVASTAVA; GOVINDJEE, 1995). Os parâmetros originados no teste JIP são categorizados em quatro grupos básicos: (i) valores básicos de fluorescência calculados ou estimados (F_0 , F_v , F_m , p.ex.); (ii) probabilidades e produtividades do sistema; (iii) fluxos de energia; e (iv) índices de vitalidade. A ilustração da relação entre os parâmetros do teste JIP e os processos subsequentes à indução da fotossíntese está apresentada na Figura 1

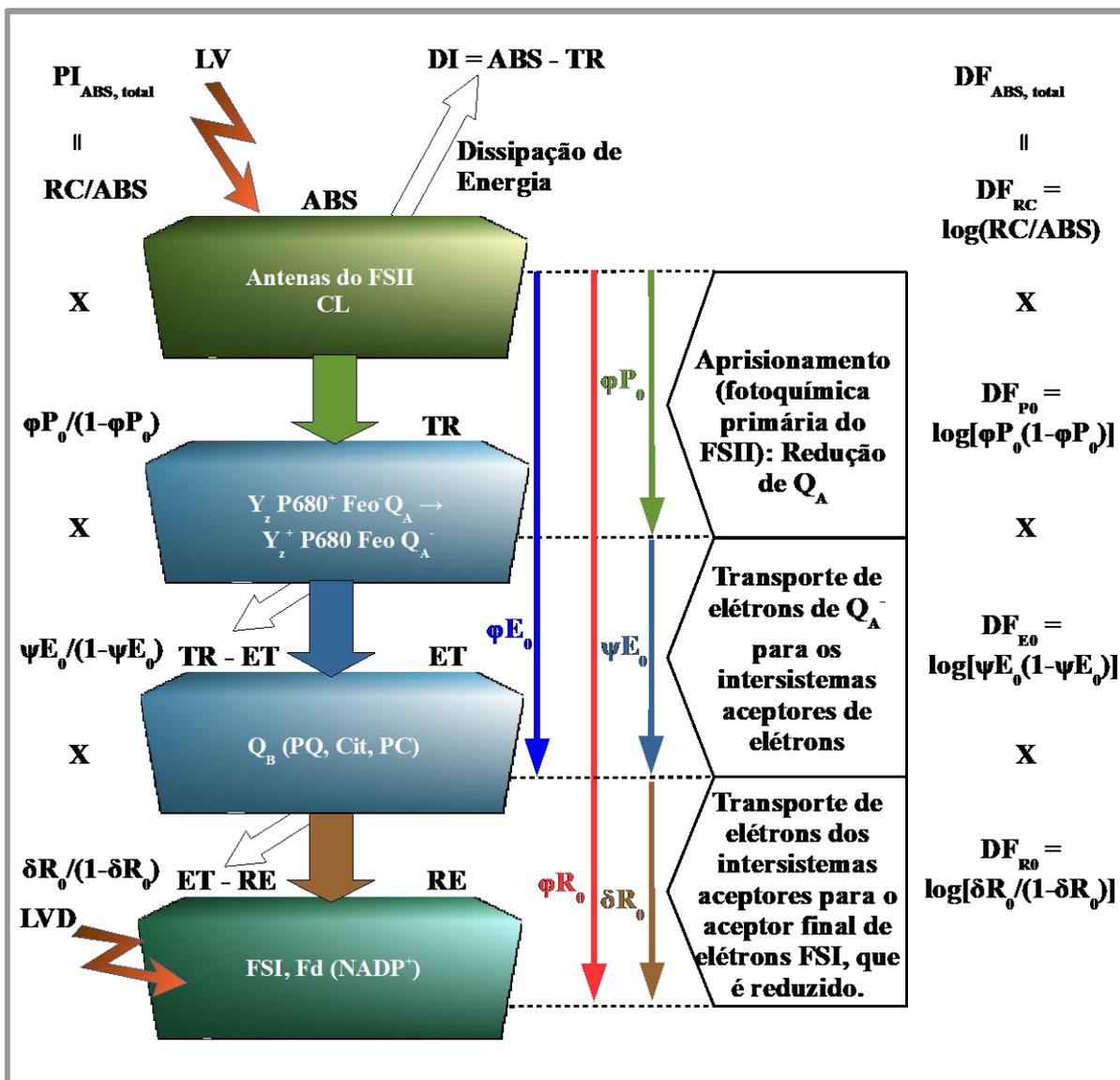


Figura 1. Esquema representativo da relação entre os parâmetros do teste JIP e a sequência de processos, durante a indução da fotossíntese. (Adaptado de Tsimilli-Michael e Strasser, 2008). ABS - Fluxo de fóton absorvido pelas unidades de antena do fotossistema II (FSII); TR - parte de ABS capturada pelos centros de reação do FSII (RC), levando a redução de Q_A , a plastoquinona primária do FSII; DI – parte de ABS dissipada na antena FSII através de processos, excetuada a captura de éxcitons; ET – fluxo de energia associado com o transporte de elétron de Q_A^- para o intersistema aceptor de elétrons; RE – fluxo de energia associado com o transporte de elétron de Q_A^- para os aceptores finais de elétrons no fotossistema I (FSI); ϕP_0 ($= TR_0/ABS$), ϕE_0 ($= ET_0/ABS$), ϕR_0 ($= RE_0/ABS$), ψE_0 ($= ET_0/TR_0$) e δR_0 ($= RE_0/ET_0$) – parâmetros relacionados às respectivas taxas de fluxos de energia; $PI_{ABS, total}$ – índices de performance para conservação de energia; DF_{ABS} – força total direcionada na base de absorção; P680 – doador primário de elétrons do FSII; Y_z – doador secundário de elétrons do FSII; Feo – feofitina; PQ – plastoquinonas; Cit – complexo citocromo *b6f*; PC – plastocianina; Fd – ferredoxina; CL – clorofila; LV – luz vermelha; e LVD – luz vermelha próxima.

As fases O-J, J-I e I-P da curva de indução de FCI correspondem à redução gradual da quinona (Q_A) e do acceptor primário de elétrons do PSII, e seu formato depende do agrupamento do FSII (banda L) (TSIMILLI-MICHAEL e STRASSER, 2013) e do balanço entre a doação de elétrons no complexo produtor de oxigênio – CPO ($CPO \rightarrow P680^+$) e a aceitação de elétrons Q_A^- (banda K) (STRASSER; TSIMILLI-MICHAEL e SRIVASTAVA, 2004).

A fase O-J se refere ao fechamento de alguns dos centros de reação (RC) do FSII em resposta a redução da Q_A , a um nível determinado pelo balanço entre a taxa de captura e a taxa de reoxidação da Q_A pela Q_B e o restante da cadeia de transferência de elétrons. A fase J-I corresponde a redução do aceptor secundário de elétrons Q_B , plastoquinona (PQ), complexo citocromo *b₆f* e plastocianina (PC). A fase I-P é normalmente atribuída à redução de transportadores de elétrons (ferredoxina, aceptores intermediários e NADP) do lado aceptor fotossistema I (KALAJI et al., 2016).

Desta forma, diversos trabalhos foram realizados, nos quais o foco foi a avaliação de estresse abiótico (DĄBROWSKI et al., 2019; KALAJI et al., 2016; VALENÇA et al., 2018) e biótico (BAURIEGEL e HERPPICH, 2014; PSHIBYTKO; ZENEVICH e KABASHNIKOVA, 2006; WAGNER; MICHALEK e JAMIOLKOWSKA, 2006) em plantas cultivadas sob diversas condições, demonstrando ser este conjunto de técnicas, uma importante ferramenta para monitoramento das condições gerais de cultivos agrícolas.

3 CAPÍTULO I

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DE SUBSTRATOS PARA PLANTAS

3.1 RESUMO

A escolha de substratos adequados é uma importante etapa em cultivos em potes, como por exemplo a produção de mudas em viveiros. O uso de substratos comerciais vem crescendo nos últimos anos, em parte pelas características químicas, físicas e biológicas favoráveis que estes materiais apresentam. No entanto, nem sempre os mesmos estão disponíveis aos produtores, os quais optam pela produção de substratos no local de produção, utilizando materiais disponíveis localmente. Entretanto, faz necessário o conhecimento das características destes materiais produzidos, para seu uso de forma segura. Foram avaliadas as características físicas e químicas de sete substratos, sendo seis obtidos pela mistura de biossólido (BIO), fibra de coco triturada (FC), vermicomposto (VC) e pó de rocha granítica (PR), e um substrato comercial a base de musgo esfagno e vermiculita (SC). As composições foram: 100% SC (S1); 75% FC + 25% VC (S2); 75% BIO + 25% FC (S3); 75% BIO + 25% PR (S4); 56% FC + 25% PR + 19% VC (S5); 56% BIO + 25% PR + 19% FC (S6); e 50% BIO + 25% PR + 25% FC (S7). As avaliações físicas consistiram na determinação de densidade volumétrica em base úmida (Du) e seca (Ds), densidade de partículas (Dp), granulometria, curvas de retenção água até 100 hPa e disponibilidade de água. As avaliações químicas foram baseadas nas determinações de pH em água, condutividade elétrica (CE), teores biodisponíveis e pseudototais de macronutrientes (P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Na) e pseudototais de metais pesados (Pb, Cd e Al). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com três repetições. Os valores de Ds variaram de 0,21 a 0,77 g cm⁻³, e Dp entre 1,19 a 2,08 g cm⁻³, sendo os menores valores referentes a S1 e os maiores a S4. Os substratos S1 e S3 apresentaram granulometria mais grosseira em comparação com os demais. O substrato comercial apresentou capacidade de retenção de água superior aos demais. O pH dos substratos variou de 3,9 (S3) a 7,6 (S2), o que foi fortemente influenciado pela adição de biossólido (acidificação) e pó de rocha granítica (basificação). Os substratos formulados apresentaram teores biodisponíveis de P, K, Ca, Mn e Zn superiores ao substrato comercial, o qual apresentou maior teor biodisponível de Mg que os demais. Os substratos S3 e S7 apresentaram alta acidez potencial, sendo que apenas em S3 foi identificada a presença de Al³⁺ (0,3 cmol_c dm⁻³). O menor teor de N ocorreu no substrato comercial (5,3 g kg⁻¹), enquanto o maior (26,0 g kg⁻¹) ocorreu em S3. Os menores teores pseudototais de P (2,1 g kg⁻¹), Mn (0,09 g kg⁻¹), Zn (19,0 mg kg⁻¹) e Cu (22,0 mg kg⁻¹) foram observados no substrato comercial. A capacidade de retenção de água a 10 hPa (CRA₁₀) de substratos formulados com pó de rocha granítica, biossólido, fibra de coco triturada e/ou vermicomposto pode ser reduzida em até 70%, em comparação com substrato comercial à base de musgo esfagno e vermiculita. O uso de biossólido e pó de rocha granítica contribuiu para a elevação da densidade de substratos produzidos, chegando a ser cerca de 3,7 vezes superior ao observado para o substrato comercial à base de musgo esfagno e vermiculita. O substrato produzido com uso de 75% de FC e 25% de VC (v/v) apresenta elevado espaço de aeração, entretanto, sem apresentar elevada capacidade de retenção de água. O substrato composto por 75% de BIO e 25% de PR (v/v), apresenta elevados teores biodisponíveis de P, Ca, Fe, Zn e Cu.

Palavras-chave: Disponibilidade de nutrientes. Meios de cultivo. Disponibilidade hídrica.

3.2 ABSTRACT

The choice of suitable substrates is an important step in cultivation in pots, such as the production of seedlings in nurseries. The use of commercial substrates has been growing in recent years, partly due to the favorable chemical, physical and biological characteristics that these materials present. However, they are not always available to producers, who choose to produce substrates at the place of production, using locally available materials. However, it is necessary to know the characteristics of these materials produced, for their safe use. The physical and chemical characteristics of seven substrates were evaluated, six obtained by mixing biosolids (BIO), crushed coconut fiber (CF), vermicompost (VC) and granite rock powder (GR), and a commercial substrate based on sphagnum moss and vermiculite (CS). The compositions were: 100% CS (S1); 75% CF + 25% VC (S2); 75% BIO + 25% CF (S3); 75% BIO + 25% GR (S4); 56% CF + 25% GR + 19% VC (S5); 56% BIO + 25% GR + 19% CF (S6); and 50% BIO + 25% GR + 25% CF (S7). The physical evaluations consisted of the determination of bulk density in wet (Dw) and dry (Dd), particle density (Dp), granulometry, water retention curves up to 100 hPa and water availability. The chemical evaluations were based on the determinations of pH in water, electrical conductivity (EC), bioavailable and pseudototal levels of macronutrients (P, K, Ca and Mg) and micronutrients (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni and Na) and pseudototals heavy metals (Pb, Cd and Al). The experimental design was completely randomized, with three replications. The values of Dd ranged from 0.21 to 0.77 g cm⁻³, and Dp between 1.19 to 2.08 g cm⁻³, with the lowest values referring to S1 and the highest to S4. The substrates S1 and S3 showed a coarser grain compared to the others. The commercial substrate showed a higher water retention capacity than the others. The pH of the substrates varied from 3.9 (S3) to 7.6 (S2), which was strongly influenced by the addition of biosolids (acidification) and granitic rock powder (basification). The formulated substrates had bioavailable contents of P, K, Ca, Mn and Zn higher than the commercial substrate, which presented a higher bioavailable content of Mg than the others. The substrates S3 and S7 showed high potential acidity, and only in S3 was the presence of Al³⁺ (0.3 cmol_c dm⁻³) identified. The lowest N content occurred in the commercial substrate (5.3 g kg⁻¹), while the highest (26.0 g kg⁻¹) occurred in S3. The lowest pseudototal levels of P (2.1 g kg⁻¹), Mn (0.09 g kg⁻¹), Zn (19.0 mg kg⁻¹) and Cu (22.0 mg kg⁻¹) were observed on the commercial substrate. The water retention capacity at 10 hPa of substrates formulated with granitic rock powder, biosolid, crushed coconut fiber and/or vermicompost can be reduced by up to 70%, compared to commercial substrate based on sphagnum moss and vermiculite. The use of BIO and GR contributes to the increase in the density of produced substrates, reaching about 3.7 times higher than that observed for the commercial substrate based on sphagnum moss and vermiculite. The substrate produced with the use of 75% CF and 25% VC (v/v) has high aeration space, however, without high water retention capacity. The substrate composed of 75% BIO and 25% PR (v/v), presents high bioavailability levels of P, Ca, Fe, Zn and Cu.

Key words: Nutrient availability. Pot mixing. Water availability.

3.3 INTRODUÇÃO

O uso de substratos para plantas vem se tornando cada vez mais importante nos dias atuais, alavancado principalmente pelo seu emprego nos cultivos de plantas ornamentais e de hortaliças, pelo menos na fase de produção de mudas. A produção brasileira de hortaliças foi de $6,3 \times 10^6$ toneladas em 2017, enquanto o comércio de plantas ornamentais movimentou ao menos R\$ 1.600 mi no mesmo ano (IBGE, 2019). O Estado de São Paulo apresentou maior produção de hortaliças ($1,7 \times 10^6$ toneladas), além de ter sido o estado onde foi produzida a maior quantidade de mudas hortícolas ($6,3 \times 10^5$ mil) no Brasil (IBGE, 2019), transformando-o em um importante consumidor de substratos para plantas.

A evolução da indústria de substratos para plantas no Brasil, no entanto, não reflete a demanda destes setores, uma vez que em 2014 existiam 43 estabelecimentos aptos para a produção, sendo que 14 estavam localizados em São Paulo (FERMINO, 2014). Em 2018, o número total de estabelecimentos subiu para 54 no Brasil, passando o Estado de São Paulo a contar com 22 estabelecimentos (dados não publicados).

Dentre os materiais mais utilizados para a produção de substratos para plantas pela indústria estão a turfa, vermiculita, perlita, casca de pinus, casca de arroz carbonizada e fibra de coco (FERMINO et al., 2018), os quais apresentam diversas vantagens em relação ao uso de solo, podendo-se destacar a prevenção de doenças de plantas, uma vez que diversas doenças de solo são potencializadas em cultivos intensivos praticados em ambientes protegidos, onde geralmente os substratos são empregados (RAVIV e LIETH, 2008).

A escolha de um substrato por parte dos produtores deve levar em consideração características como adequado balanço entre água e oxigênio na rizosfera, boa estrutura e consistência, baixa retração e expansão quando submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, baixa hidrofobicidade, isenção de substâncias tóxicas e propágulos de plantas invasoras, de insetos, baixa salinidade e disponibilidade (KÄMPF, 2005; SCHINDLER e MÜLLER, 2017). Todavia, alguns materiais comumente utilizados na fabricação de substratos, como por exemplo as turfás, são extraídos em jazidas naturais, cuja exploração pode provocar desequilíbrio ambiental, tendo em vista que se trata de um recurso natural finito, e que desempenha funções específicas no ecossistema. Desta forma, pesquisas têm sido realizadas com o intuito de reduzir o consumo destes materiais (CHAUDHARY; BHANDARI e SHUKLA, 2004; HENÁNDEZ-APAOLAZA et al., 2005).

Com esta visão, aliada à necessidade de dar destinação adequada aos resíduos gerados em atividades industriais, diversos estudos tem sido realizados visando à avaliação deste tipo de materiais como constituinte de substrato para plantas, podendo-se citar o uso de biossólido (ABREU et al., 2017a; TRAZZI et al., 2014), fibra de coco (OLIVEIRA et al., 2018; SILVEIRA et al., 2002), pó de rocha granítica (PARADELO et al., 2016), fibra de palmeira (FERMINO et al., 2014), entre outros.

A qualidade de um substrato deve ser avaliada com base em sua formulação final, sendo esta mais importante até que as características individuais dos seus constituintes (FERMINO, 2014). Assim, quanto maior for o número de pesquisas sobre o uso de diferentes fontes de resíduos em substratos, melhor será para a agricultura e indústria nacionais, já que será possível selecionar materiais disponíveis regionalmente, dando destinação ecologicamente mais segura aos mesmos.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar aspectos físicos e químicos de substratos produzidos a partir da mistura de biossólido, fibra de coco tritura, vermicomposto e pó de rocha granítica, em diferentes proporções.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

Foram avaliadas características químicas e físicas de seis substratos obtidos pela mistura de biossólido (BIO), fibra de coco triturada (FC), vermicomposto (VC) e pó de rocha granítica (PR), assim como um substrato comercial (SC) a base de musgo esfagno e vermiculita.

Logo que foram recepcionados no local do experimento, os materiais foram destorroados, secos ao ar por 24 h e passados por uma peneira de malha com quatro milímetros de abertura, para a remoção das partículas grosseiras eventualmente presentes. Os substratos foram obtidos pela mistura manual dos materiais, até homogeneidade visual. As proporções de cada substrato, em base de volume foram: S1 - 100% SC; S2 - 75% FC + 25% VC; S3 - 75% BIO + 25% FC; S4 - 75% BIO + 25% PR; S5 - 56% FC + 25% PR + 19% VC; S6 - 56% FC + 25% PR + 19% BIO; e S7 - 50% BIO + 25% PR + 25% FC.

A fibra de coco triturada utilizada consistiu no produto comercial Golden Mix granulado Tipo 11 (Amafibra, Artur Nogueira/SP). O biossólido ou lodo de esgoto estabilizado foi gerado na estação de tratamento de esgoto Ilha do Governador/RJ, e fornecido pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE). O vermicomposto foi produzido e fornecido pela Fazendinha Agroecológica do Km 47 (convênio UFRRJ/Embrapa Agrobiologia), após o processo de vermicompostagem de esterco bovino por minhocas da espécie *Eisenia foetida*, com posterior solarização. O pó de rocha granítica, também conhecido como lama abrasiva, foi proveniente da serragem de blocos de rochas ornamentais, pelo método do tear, e fornecido por duas serrarias sediadas em Vargem Alta/ES e em Marechal Floriano/ES. As características químicas dos materiais utilizados na confecção dos substratos estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas pseudototais de materiais utilizados na composição dos substratos.

Material	pH	CE	N	P	K	Ca	Mg
		mS cm ⁻¹	(g kg ⁻¹)				
Biossólido	5,1	4,0	34,8	31,2	0,8	14,5	2,3
Fibra de coco triturada	6,2	0,6	6,8	2,5	0,4	7,0	1,4
Pó de rocha granítica	5,6	0,3	0,7	13,1	2,9	14,5	6,2
Vermicomposto	5,9	4,8	34,9	34,5	6,4	15,2	6,8
Material	Mn	Fe	Na	Zn	Cu	Ni	Al
	(mg kg ⁻¹)						
Biossólido	3.200	19.724	416	13.173	2.928	303	25.733
Fibra de coco triturada	19	491	284	11	15	4	25.135
Pó de rocha granítica	7.562	47.499	716	1.196	1.204	565	12.645
Vermicomposto	14.810	4.948	441	2.808	406	43	7.933

CE – Condutividade elétrica.

As características físicas avaliadas foram densidade volumétrica em base úmida (D_u) e seca (D_s), densidade de partículas (D_p), granulometria e capacidade de retenção de água. As avaliações das características químicas foram baseadas na determinação dos teores biodisponíveis e pseudototais de diversos nutrientes.

Com a finalidade de aferir a uniformidade das condições iniciais das amostras, determinou-se a umidade gravimétrica atual (U) das mesmas antes do início dos testes, pelo

método da estufa, sob temperatura de 65 °C, utilizando alíquotas com aproximadamente 100 g, sendo realizadas três determinações por amostra.

As densidades (D_u e D_s) foram determinadas pelo método da autocompactação (FERMINO, 2014), descrito como padrão para avaliação de substratos para plantas no Brasil, conforme estabelecido na Instrução Normativa SDA nº 17, de 21 de maio de 2007 (BRASIL, 2007). Para isso, foi adicionado aproximadamente 300 mL de substrato em uma proveta plástica graduada de massa conhecida (M_p), com capacidade para 500 mL, pesando-se todo o conjunto (M_t). Em seguida o conjunto proveta + substrato foi acoplado a uma estrutura constituída por um segmento de tubo com aproximadamente 50 cm de altura por 10 cm de diâmetro, fechada na parte superior com um tampão, onde foi fixado um cabo de sustentação (Figura 2A-B). Foram construídos dois orifícios na parte superior do tubo, com aproximadamente 16 cm², os quais serviram de acesso para a sustentação da proveta, conforme ilustrado na Figura 2.

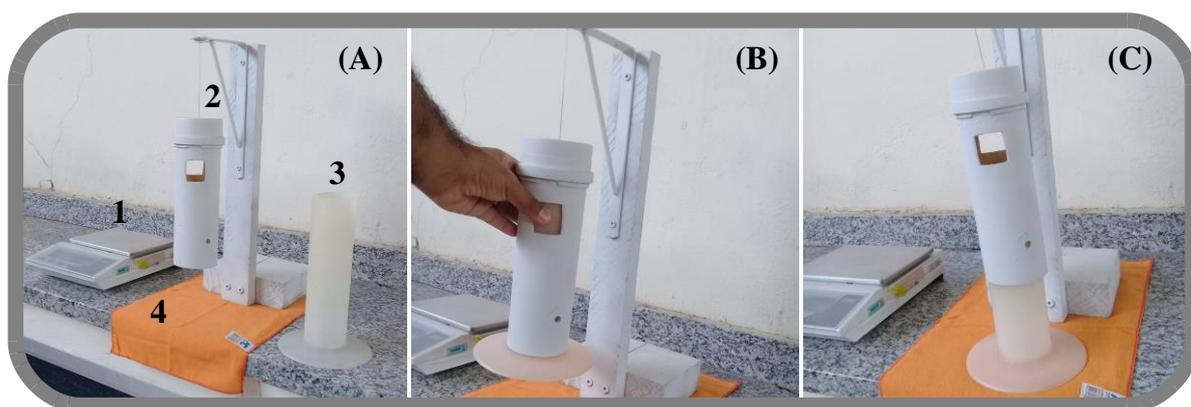


Figura 2. Visão geral do dispositivo para a determinação de densidades úmida e seca dos substratos pelo método da autocompactação. A – Balança digital (1); Suporte de elevação do conjunto proveta + substrato (2); Proveta graduada de 500 mL (3); e Tecido tipo flanela para amortecimento do contato entre a proveta e a superfície da bancada. B - Elevação da proveta + substrato a 10 cm em relação à superfície da bancada de testes. C - Proveta sobre a bancada de testes, após a queda de 10 cm.

Os testes foram realizados em uma bancada de granito, existente no Laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, sobre a qual foi estendido um pedaço de tecido do tipo flanela, utilizado para amortecimento da proveta. A proveta foi elevada a uma altura de 10 cm em relação a bancada, deixando-se o conjunto cair em queda livre, repetidamente por 10 (dez) vezes. Ao fim deste ciclo realizou-se a leitura do novo volume ocupado pela amostra (V_f). A determinação de D_u foi feita mediante aplicação a Equação 1.

$$D_u = \frac{M_t - M_p}{V_f} \quad (1)$$

em que:

D_u – densidade volumétrica em base úmida (g cm⁻³);

M_t – massa do conjunto proveta + substrato (g);

M_p – massa da proveta (g); e

V_f – leitura do volume ocupado pela amostra ao fim do teste (1 mL = 1 cm³).

Determinados os valores de U e D_u para cada amostra, foi possível a determinação de D_s , mediante aplicação da Equação 2.

$$D_s = D_u \times (1 - U) \quad (2)$$

A densidade das partículas (D_p) foi determinada conforme adaptação do método descrito por Fermino (2014). Massas secas de substratos correspondentes a 25 cm^3 (M_s) foram pesadas, utilizando-se os respectivos valores de D_u e U , e adicionadas em frascos de vidro tipo becker com capacidade de 100 mL, aos quais foram adicionados cerca de 50 mL de água deionizada. As misturas foram então fervidas em “banho-maria” por aproximadamente 30 minutos, visando a remoção de gases. Após este período, o material foi resfriado até temperatura ambiente, sendo então transferido cuidadosamente para um balão volumétrico com capacidade de 250 mL e de massa conhecida (M_b). O volume do balão foi completado com água destilada, após o que o conjunto foi pesado (M_t). Com tais medidas foi possível a determinação da massa de água adicionada (M_a), pela relação $M_a = M_t - M_b - M_s$. Conhecendo-se tais medidas e, assumindo que $1,0 \text{ g} = 1,0 \text{ mL}$ de água, foi possível a determinação de D_p , conforme a Equação 3.

$$D_p = \frac{M_s}{250 - M_a} \quad (3)$$

em que:

250 - Volume útil do balão volumétrico, em cm^3 .

A granulometria foi determinada pelo método das peneiras, no Laboratório de Física do Solo/UFRRJ. Foram utilizadas alíquotas de substrato seco ao ar com aproximadamente 100 g. Após pesado, o material foi transferido para um conjunto de peneiras com malhas de 2,00 mm; 1,00 mm; 0,50 mm e 0,106 mm, instalado em um agitador mecânico, nesta ordem de altura. O conjunto foi agitado mecanicamente por três minutos, determinando-se a massa retida em cada uma das peneiras, assim como do material que eventualmente passou peneira de menor abertura de malha (0,11 mm). Com isso, foi possível determinar a relação percentual entre a massa total e as retidas em cada peneira.

Foram obtidos 4 (quatro) pontos da curva de retenção (0 hPa, - 10 hPa, - 50 hPa e - 100 hPa) pelo método da mesa de tensão (OLIVEIRA, 1968). Para isso, foram obtidas três amostras por substrato, cujas determinações foram executadas simultaneamente, sendo realizados três testes (repetições). O preparo das amostras consistiu na acomodação de massas de substrato seco ao ar, equivalentes a $79,52 \text{ cm}^3$, em anéis volumétricos de PVC ($\phi = 4,5 \text{ cm}$ e $h = 5 \text{ cm}$), os quais foram vedados em uma das extremidades com tecido voil ($\phi \approx 8 \text{ cm}$), presos por atilhos de borracha. Para a determinação destas massas foram utilizados os valores de D_u , obtidos conforme a metodologia descrita anteriormente (método da autocompactação). A acomodação nos anéis foi feita dividindo-se as massas dos substratos em duas partes de massas iguais, sendo cada uma acomodada nos anéis volumétricos, em camadas sobrepostas com 2,5 cm de altura cada, com auxílio de um disco rígido e plano com diâmetro igual ao diâmetro interno do anel volumétrico, o que foi suficiente para garantir a reprodução das densidades de cada substrato.

Em seguida, as amostras foram saturadas pela imersão dos anéis já preenchidos com substrato em um recipiente com água até 0,5 cm da parte superior, onde permaneceram por 24 horas. Após este período, as amostras foram retiradas e imediatamente pesadas em uma balança semianalítica. Após a pesagem, as amostras foram novamente saturadas, repetindo-se o processo descrito, simultaneamente com o preparo da mesa de tensão, conforme os procedimentos descritos a seguir.

A mesa possuía um tampo de 80 cm x 80 cm, onde foi instalado um vidro de 4 mm de espessura. Este, por sua vez, possuía um orifício de 0,8 mm no centro, onde foi instalada uma mangueira para a drenagem da água.

A preparação da mesa foi realizada antes de cada medição (aos 10 hPa, 50 hPa e 100 hPa), conforme os passos seguintes: *i*) nivelamento; *ii*) adição de água pela parte superior, até

se formar uma lâmina de aproximadamente 1 (um) cm sobre o vidro; *iii*) instalação de uma peça de tecido *voil* com 50 cm x 50 cm sobre o vidro, seguido de uma folha de papel mata-borrão, com aproximadamente 60 cm x 60 cm (gramatura de 250 g cm⁻²); e *iv*) remoção de bolhas de ar do sistema, com auxílio de um cilindro com superfície lisa.

Finalizada a preparação da mesa, as amostras saturadas foram cuidadosamente posicionadas sobre esta, de tal forma a evitar a formação de bolhas de ar no fundo das amostras, bem como tomando-se o cuidado de distribuí-las de tal forma que o orifício do vidro não fosse obstruído e que estas permanecessem equidistantes ao mesmo. A mesa possuía um frasco kitassato adaptado, ao qual foi conectada a mesma mangueira ligada ao orifício central do vidro. Numa saída lateral do frasco, foi instalada outra mangueira para drenagem da água das amostras. Antes dos testes, o kitassato permaneceu posicionado de tal forma que a saída de água estivesse nivelada com a lâmina de água sobre o vidro, ou seja, desnível igual a zero. O início dos testes foi marcado pelo posicionamento da saída do kitassato a 10 cm, 50 cm e 100 cm abaixo do nível referente à metade da altura das amostras, sendo referentes às tensões de 10 hPa, 50 hPa e 100 hPa, respectivamente.

Iniciado cada teste, aguardava-se o fim da drenagem das amostras, o que, quando ocorria, caracterizava o fim de teste, sendo possível proceder a pesagem das amostras. Ao final de todos os testes as amostras foram secas em estufa a 65 °C por 48 h ou até massa constante, para fins de determinação da massa seca contida em cada anel, e determinação da umidade volumétrica (θ) em cada uma das medições.

A disponibilidade de água foi avaliada com base nas curvas de retenção até 100 hPa, mediante representação gráfica de θ no eixo das ordenadas e tensão nas abcissas, assim como pelos cálculos de porosidade total (PT), capacidade de retenção a 10 hPa (CRA₁₀), espaço de aeração (EA), água facilmente disponível (AFD), água tamponante (AT), água disponível (AD) e água remanescente a 100 cm (AR₁₀₀) (DE BOODT e VERDONCK, 1972; MAPA, 2007).

As determinações de PT, EA, AFD, AT, AD, CRA₁₀ e AR₁₀₀ foram realizadas mediante uso das Equações 4 a 9, respectivamente, utilizando-se os dados obtidos durante os testes com a mesa de tensão, conforme descrito anteriormente.

$$PT = \frac{M_{u0} - M_s}{V_a} \times 100 \quad (4)$$

$$EA = \frac{M_{u0} - M_{u10}}{V_a} \times 100 \quad (5)$$

$$AFD = \frac{M_{u10} - M_{u50}}{V_a} \times 100 \quad (6)$$

$$AT = \frac{M_{u50} - M_{u100}}{V_a} \times 100 \quad (7)$$

$$AD = \frac{M_{u10} - M_{u100}}{V_a} \times 100 \quad (8)$$

$$AR_{100} = \frac{M_{u100} - M_s}{V_a} \times 100 \quad (9)$$

em que:

- PT – porosidade total (% , v/v);
- M_{u0} – massa úmida na tensão de 0 hPa (g);
- M_s – massa seca em estufa (g);
- V_a – volume do anel (cm³);
- EA – espaço de aeração (% , v/v);
- M_{u10} – massa úmida na tensão de 10 hPa (g);

AFD – água facilmente disponível (% , v/v);
M_{u50} – massa úmida na tensão de 50 hPa (g);
AT – água tamponante (% , v/v);
M_{u100} – massa úmida na tensão de 100 hPa (g);
AD – água disponível (% , v/v); e
AR₁₀₀ – água remanescente a 100 cm (% , v/v).

As análises químicas dos substratos foram realizadas no Laboratório de Análise de Resíduos e da Interação Solo-Planta – LSP/UFRRJ, e consistiram na determinação do pH, condutividade elétrica (CE), teores biodisponíveis de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg), micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu e Ni), Na, Al, H, valor S e valor V. Foram determinados ainda os teores pseudototais dos elementos citados, além de Pb e Cd.

O pH foi determinado em água na concentração de 1:5, conforme adaptação do método descrito na Instrução Normativa DAS, nº 17, de 21 de maio de 2007 (MAPA, 2007), utilizando-se 30 cm³ de substrato para 150 mL de água deionizada, e agitação por três horas a 120 rpm, em uma mesa agitadora mecânica. Após 5 minutos em descanso, foi retirada uma alíquota de 30 mL a qual foi utilizada na leitura com uso de um potenciômetro de bancada. Na mesma alíquota, foi determinada CE, através de um condutivímetro de bancada previamente calibrado.

As características químicas biodisponíveis dos substratos foram determinadas conforme Teixeira et al. (2017b), enquanto as características pseudototais seguiram os procedimentos descritos pelo método EPA 3050B (EPA, 1996). O método foi executado adicionando-se, aproximadamente, 1 (um) g das amostras em tubo de digestão tipo pirex, com auxílio de um funil de vidro, o qual foi mantido na parte superior do tubo, visando a redução da perda de gases durante o processo de digestão. Os tubos foram então inseridos em bloco digestor, com temperatura regulada 95 °C ± 5 °C, tendo sido adicionado 5,0 mL de HNO₃ (VETEC 65%), condição em que permaneceram por aproximadamente 15 minutos. Após este período, foi adicionado mais 10,0 mL de HNO₃ (VETEC 65%) em cada tubo, de maneira que se procedeu a “lavagem” das paredes dos mesmos. Nesta condição, as amostras permaneceram por mais 2 (duas) horas no bloco digestor. Logo após, as amostras foram retiradas do bloco e resfriadas até temperatura ambiente, adicionando-se 8,0 mL de H₂O₂ (VETEC 30%) e novamente posicionadas no bloco digestor por mais duas horas sob temperatura de 95 ± 5 °C. Ao fim deste processo, adicionou-se mais 10,0 mL de HCl (VETEC 37%) às amostras, tendo as mesmas permanecido por mais 30 minutos no bloco digestor aquecido (95 ± 5 °C), dando-se então por encerrada a fase de digestão. Em seguida, os extratos digeridos foram avolumados para 50 mL com água destilada e deionizada, e foram então filtrados em papel de filtro (filtração lenta) e armazenados em frascos de polietileno devidamente identificados.

Foram realizadas provas em branco a cada grupo de 40 amostras analisadas para fins de quantificação da presença de eventuais impurezas dos reagentes utilizados. Para isso, todos os procedimentos descritos acima para as amostras, com exceção da adição de substratos, foram repetidos.

O teor de P nos extratos foi determinado por colorimetria do metavanadato, em espectrofotômetro de luz visível em comprimento de onda ajustado a 420 nm. Já para os teores de Na e K considerou-se a metodologia proposta por (TEIXEIRA et al., 2017), que consistiu na aspiração do extrato digerido na chama ar-GPL do fotômetro de chama, sendo as energias emitidas por esses elementos proporcionais às respectivas concentrações no extrato.

Os teores dos demais elementos nos extratos foram quantificados por Espectrometria de Absorção Atômica em equipamento modelo Varian SpectrAA 55B (Agilent, Santa Clara, CA/EUA), pertencente instalado no Laboratório de Absorção Atômica/UFRRJ.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com três repetições analíticas. Somente para as análises realizadas na mesa de tensão, considerou-se como cada

repetição um novo teste, sendo cada repetição composta, nesse caso, por uma triplicata. A normalidade e homogeneidade dos resíduos foram verificadas através dos testes de Lilliefors e Bartlet, respectivamente, ao nível de significância de 5%. Quando as variáveis não apresentaram ao menos distribuição normal dos resíduos, procedeu-se a transformação dos dados utilizando-se diversas funções. Caso fossem atendidos os pressupostos básicos para realização dos testes de Anova, e, observando-se significância pelo teste F a 5% de probabilidade, procedeu-se o teste de agrupamento de médias de Skott-Knott a 5% de probabilidade. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade foi aplicado aos dados das curvas de retenção para verificação de eventuais diferenças entre as repetições e entre os substratos. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa computacional R (R CORE TEAM, 2019).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Características Físicas

As amostras apresentaram umidade gravimétrica (U) similares no momento das análises, não sendo observadas diferenças estatísticas pelo teste F a 5% de probabilidade (Tabela 2). Esta condição permitiu a comparação entre os substratos, sobretudo no que se referiu às determinações de densidade volumétrica em base úmida (D_u) e seca (D_s), uma vez que estas características são influenciadas pela umidade dos substratos (FERMINO e KÄMPF, 2012).

Tabela 2. Valores médios e desvio padrão de características físicas de substratos produzidos pela mistura de bio sólido, fibra de coco triturada, vermicomposto e pó de rocha granítica.

Substrato	U	D_u	D_s	D_p
	($g\ g^{-1}$)	(g cm^{-3})		
S1 - 100% SC	16,2* a \pm 0,7	0,26 f \pm 0,00	0,21 e \pm 0,02	1,19 e \pm 0,02
S2 - 75% FC + 25% VC	11,9 a \pm 1,2	0,36 e \pm 0,01	0,32 d \pm 0,02	1,39 d \pm 0,03
S3 - 75% BIO + 25% FC	15,6 a \pm 3,3	0,75 b \pm 0,01	0,64 b \pm 0,03	1,66 c \pm 0,05
S4 - 75% BIO + 25% PR	15,6 a \pm 1,8	0,91 a \pm 0,01	0,77 a \pm 0,01	2,08 a \pm 0,02
S5 - 56% FC + 25% PR + 19% VC	12,9 a \pm 2,0	0,64 c \pm 0,01	0,56 c \pm 0,01	2,05 a \pm 0,06
S6 - 56% FC + 25% PR + 19% BIO	13,9 a \pm 2,1	0,61 d \pm 0,01	0,52 c \pm 0,01	2,07 a \pm 0,01
S7 - 50% BIO + 25% PR + 25% FC	15,5 a \pm 3,9	0,63 c \pm 0,01	0,53 c \pm 0,03	1,96 b \pm 0,08

SC – Substrato comercial; FC - fibra de coco triturada; VC - vermicomposto; BIO - bio sólido; PR - pó de rocha granítica; U – umidade inicial; D_u – densidade volumétrica em base úmida; D_s – densidade volumétrica em base seca; D_p – densidade de partículas; e *Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Os menores valores de D_u , D_s e D_p foram observados para os substratos S1 e S2, enquanto S4 apresentou maiores valores para essas variáveis (Tabela 2). Em comparação com o substrato S1, valores de D_u e D_s para S4 foram, respectivamente, 3,5 e 3,7 vezes superiores (Tabela 2). De maneira geral, a elevação das densidades esteve relacionada, principalmente, à presença de bio sólido e pó de rocha granítica nos substratos. Sabe-se que o processamento do bio sólido, principalmente a trituração após o processo de compostagem, tende a reduzir o tamanho das partículas desse material (ABREU et al., 2017a; TRAZZI et al., 2014), fazendo com que seu uso represente a elevação das densidades dos substratos resultantes. O pó de rocha granítica possui granulometria predominantemente fina (diâmetro de partículas inferior a 0,1 mm) (MANHÃES e HOLANDA, 2008) e densidade aparente próxima a 1,0 g cm^{-3} (dados obtidos, porém não apresentados), conferindo assim, capacidade de elevação da densidade dos substratos produzidos.

De Boodt e Verdonck (1972) definiram o substrato ideal como sendo aquele que, dentre outras características, possua D_s de até 0,4 g cm^{-3} . No presente trabalho, apenas os substratos S1 e S2 atenderam esse critério (Tabela 2). No entanto, esta definição deve ser analisada com cautela, tendo em vista que a D_s ideal de um substrato deve levar em conta também sua aplicação.

Da mesma forma, a variação de D_p dependeu do tipo de material utilizado na composição do substrato, sendo observada maior influência do pó de rocha granítica e dos materiais de constituição predominantemente orgânica sobre o resultado final dessa característica (Tabela 2). Substratos com pó de rocha granítica em sua composição apresentaram valores de D_p entre $1,96 \text{ g cm}^{-3}$ e $2,08 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 2). O pó de rocha granítica é constituído principalmente por quartzo (MANHÃES e HOLANDA, 2008), que possui D_p igual a $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ (MACEDO e CRESTANA, 1999), sendo que o material utilizado no presente trabalho possuía D_p igual a $2,58 \text{ g cm}^{-3}$, o que pode explicar os valores relativamente elevados de D_p obtidos no presente trabalho.

Os substratos S1, S2 e S3 apresentaram menores valores de D_p , sendo, respectivamente, 1,19; 1,39 e $1,66 \text{ g cm}^{-3}$. Referente aos dois últimos, os valores refletiram as composições dos respectivos substratos, haja vista que D_p da fibra de coco triturada, do vermicomposto e do biossólido foram, 0,66; 1,68 e $1,57 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente (Tabela 2).

Como pode ser visualizado na Figura 3, o substrato S1 apresentou predominância de granulometria grosseira, com cerca de 67% das partículas apresentando diâmetro superior a 1,0 mm. Já em S2, o percentual de partículas com diâmetro superior a 1,0 mm foi de aproximadamente 37%, enquanto partículas com diâmetro entre 0,5 e 1,0 mm corresponderam a 41% do total (Figura 3).

Cerca de 88% das partículas de S3 tinham diâmetro entre 0,1 mm e 2,0 mm. Com exceção de S1 e S2, houve predomínio de granulometria inferior a 1,0 mm para os substratos produzidos (Figura 3).

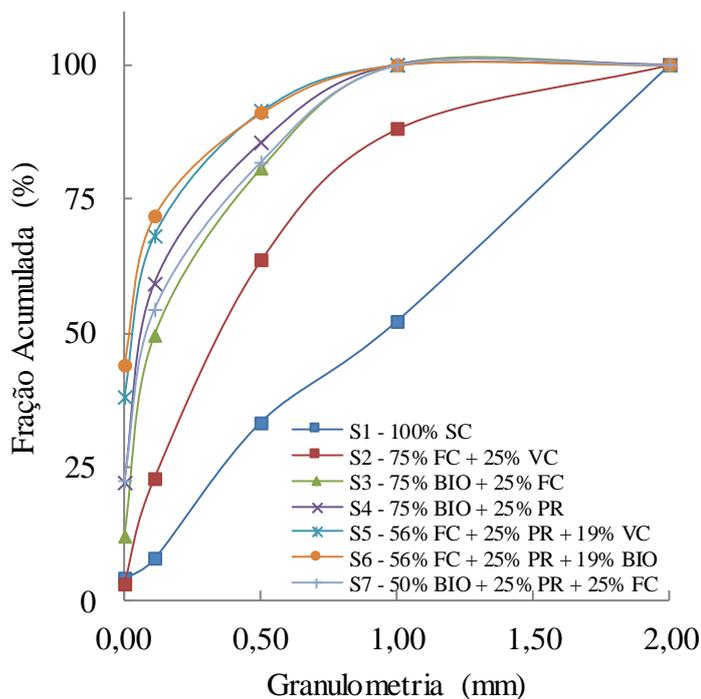


Figura 3. Frações granulométricas acumuladas de substratos produzidos com uso de fibra de coco triturada (FC), biossólido (BIO), vermicomposto (VC) e pó de rocha granítica (PR).

De maneira geral, substratos com granulometria fina tendem a apresentar maior volume de microporos em comparação ao de macroporos e, conseqüentemente, redução na disponibilidade de água (SCHINDLER et al., 2017), sendo o contrário verdadeiro. Entretanto, isso não foi observado no presente trabalho para o substrato S2, o qual apresentou cerca de 63%

da granulometria ocupada por partículas com diâmetro inferior a 0,5 mm (Figura 3), porém relativa baixa capacidade de retenção de água (Figura 4 e Tabela 3).

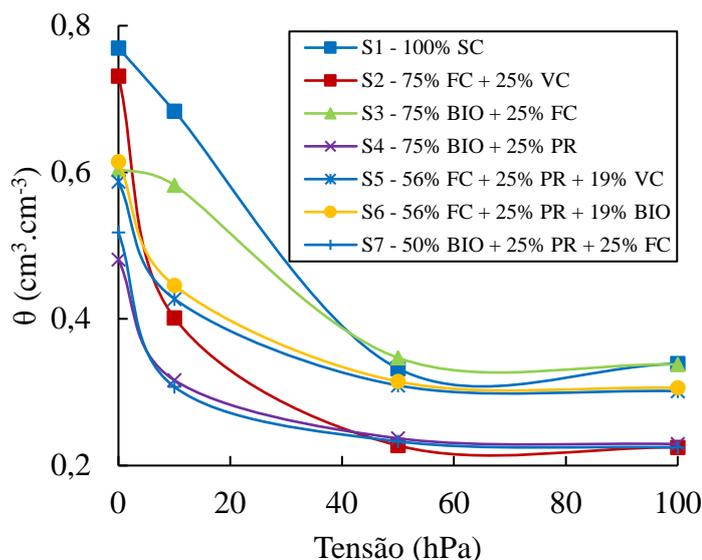


Figura 4. Curvas de retenção de água calculadas pelo método da mesa de tensão de substrato comercial (SC) e substratos produzidos a partir da mistura de biossólido (BIO), fibra de coco triturada (FC), vermicomposto (VC) e pó de rocha granítica (PR). θ – umidade volumétrica.

Não foram observadas diferenças significativas entre as três repetições analíticas para todos os substratos testados, pelo teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade ($X^2_{(2)} = 0,33758$, $P = 0,8447$), porém as amostras diferiram entre si pelo mesmo teste ($X^2_{(6)} = 19,763$, $P = 0,003$).

Na condição de saturação (0 hPa), os substratos S1 e S2 apresentaram valores de umidade volumétrica (θ) semelhantes e superiores aos obtidos para os demais substratos (Figura 4). Sob essa mesma tensão, o grupo formado pelos substratos S3, S5 e S6 apresentou valores de θ similares, sendo esses superiores aos observados para os substratos S4 e S7, os quais apresentaram valores de θ similares entre si e inferiores aos demais. A partir de 10 hPa ocorreu uma queda brusca de θ para o substrato S2, o que não ocorreu para S1 e S3, demonstrando que o primeiro possuía baixa capacidade de retenção de água sob 10 hPa, embora tivesse apresentado relativa alta porosidade (Tabela 3).

De forma geral, os substratos S1 e S3 apresentaram capacidade de retenção de água até 100 hPa superior aos demais substratos, enquanto S2, S4 e S7 apresentaram capacidade retentora de água inferiores, em comparação com os demais substratos estudados (Figura 4). No caso do substrato S2 é provável que o uso de FC tenha reduzido a capacidade retentora de água (ABAD et al., 2005), uma vez que esse substrato possuía maior percentual desse material em sua composição. Nos casos dos substratos S4 e S7 é provável que a redução da porosidade (Tabela 3), em virtude da combinação do uso de biossólido e pó de rocha granítica, tenha ocasionado a redução da capacidade de retenção de água.

Tabela 3. Valores médios e desvio padrão de disponibilidade de água de substrato comercial (SC) e substratos formulados com biossólido (BIO), fibra de coco triturada (FC), vermicomposto (VC) e pó de rocha granítica (PR).

Substrato	CRA ₁₀	EA ²	PT ¹	AFD ¹	AT ³	AD ¹	AR ₁₀₀ ¹
	(%)						
S1 - 100% SC	69,2* a ± 3,1	22,2 b ± 5,6	91,4 a ± 4,7	26,0 a ± 6,0	0,6 b ± 0,8	26,5 a ± 5,8	42,7 a ± 6
S2 - 75% FC + 25% VC	40,2 c ± 6,7	33,0 a ± 9,9	73,1 b ± 6,4	17,4 b ± 6,4	0,4 b ± 0,6	17,9 b ± 6,5	22,3 d ± 2,3
S3 - 75% BIO + 25% FC	48,5 b ± 2,7	11,9 c ± 4,9	60,4 c ± 2,8	19,6 a ± 2,8	0,8 a ± 0,8	20,4 a ± 3,1	28,1 c ± 1,6
S4 - 75% BIO + 25% PR	31,6 e ± 1,4	16,5 c ± 6,3	48,1 d ± 5,7	7,9 d ± 1,0	0,8 a ± 0,4	8,7 d ± 1,3	22,9 d ± 0,8
S5 - 56% FC + 25% PR + 19% VC	42,7 c ± 3,1	16,0 c ± 8,1	58,7 c ± 5,5	11,8 c ± 3,0	0,8 a ± 0,6	12,6 c ± 2,8	30,1 b ± 0,9
S6 - 56% FC + 25% PR + 19% BIO	44,5 c ± 3,2	17,0 c ± 6,7	61,5 c ± 4,6	13,1 b ± 3,1	0,9 a ± 0,7	13,9 b ± 3,2	30,5 b ± 1,2
S7 - 50% BIO + 25% PR + 25% FC	36,8 d ± 2,4	15,0 c ± 6,6	51,8 d ± 6,3	8,9 d ± 1,9	1,0 a ± 0,6	9,9 d ± 2	26,9 c ± 1

CRA₁₀ – Capacidade de retenção de água a 10 cm; EA – espaço de aeração; PT – porosidade total; AFD – água facilmente disponível; AT – água tamponante; AD – água disponível; AR₁₀₀ – água remanescente a 100 cm; ¹Dados transformados em $\frac{1}{(x)}$; ²Dados transformados em $\sqrt{(x)}$; ³Dados transformados em $\sqrt[3]{(x)}$; e *Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Os maiores valores de CRA_{10} , PT, AFD, AD e AR_{100} foram observados para o substrato comercial (100% SC), enquanto os menores valores estiveram associados ao substrato S4 (Tabela 3). O substrato S2 possuía maior espaço de aeração (EA), sendo que o teor de AFD desse substrato foi estatisticamente igual ao valor observado para S6, reafirmando o fato de que a fibra de coco é um material que, embora proporcione elevação do volume de poros, reduz a capacidade de retenção de água nos substratos produzidos (ABAD et al., 2005). Tal efeito pode ser devido à baixa interação entre as partículas desse material com a água, e até mesmo certo grau de hidrofobicidade que o mesmo apresenta, embora essa característica não tenha sido avaliada no presente trabalho, porém, foi observada no transcorrer do experimento.

3.5.2 Características Químicas

Foram observadas diferenças significativas entre os substratos testados quanto a pH em água, CE e teores biodisponíveis de macronutrientes (P, K, Ca e Mg) (Tabela 4).

Para fins comparativos, optou-se por utilizar a faixa de pH entre 5,5 e 6,5 como sendo “ideal”, tendo em vista que nessa condição há maior disponibilidade para a maioria dos nutrientes para a maioria dos solos. Nenhum dos substratos testados apresentou pH dentro desta faixa (Tabela 4). O valor mais próximo (5,4) ocorreu em S4, sendo que, além desse último, S1, S3 e S7 apresentaram valores de pH inferiores a 5,5, enquanto os demais substratos apresentaram valores de pH superiores a 6,5 (Tabela 4).

Esses resultados evidenciam a influência da adição de bio sólido nos substratos produzidos, sobretudo na ausência de pó de rocha granítica, em que foi observada a redução do pH dos substratos produzidos. Esse efeito também foi observado por Santos et al. (2014) ao avaliar substratos obtidos pela mistura de doses crescentes de bio sólido com fibra de coco, vermiculita, palha de café in natura, composto orgânico, casca de arroz carbonizada e casca de arroz in natura. Por outro lado, Abreu et al. (2017a) verificaram elevação do pH em função do incremento da dosagem de bio sólido em mistura com um substrato comercial à base de casca de *Pinus* bioestabilizada. Esses resultados de pesquisa, incluindo os obtidos no presente trabalho, evidenciam que a alteração do pH da mistura final de um substrato pode ser dependente da condição inicial do bio sólido utilizado, haja vista que o pH do resíduo utilizado por Santos et al. (2014) era 4,7 e acidificou os substratos produzidos, assim como ocorreu no presente trabalho, em que o pH inicial do bio sólido era 5,1. Por outro lado, o bio sólido utilizado por Abreu et al. (2017a) tinha pH igual a 5,8 e basificou os substratos produzidos.

O pó de rocha granítica contribuiu para a elevação do pH em dois dos três substratos com pH superior a 6,3 (Tabela 4). A capacidade neutralizadora de acidez deste tipo de material foi mensurada por Barral Silva et al. (2005), que verificaram a neutralização de até 200 $cmol_c H^+$ por kg de pó de rocha granítica, em médio prazo, até pH 4,5.

A condutividade elétrica variou de 0,6 a 2,0 $mS\ cm^{-1}$, sendo o menor valor observado para o substrato comercial (S1), enquanto os substratos S2, S4 e S7 apresentaram maiores valores de CE, dentre os substratos estudados, não sendo tais valores diferentes entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade (Tabela 4).

A classificação dos teores biodisponíveis de macro e micronutrientes no presente trabalho foi realizada com base nos limites estabelecidos no Manual de Recomendação de Calagem e Adubação para o Estado do Espírito Santo (PREZOTTI et al., 2007), considerando o referencial de solos com textura arenosa e cultivo de hortaliças para fósforo e potássio.

Tabela 4. Média e desvio padrão de características químicas biodisponíveis (pH, CE e macronutrientes e micronutrientes) de substratos para plantas.

Substrato	pH	CE	P ⁴⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ^{2+*}
	(H ₂ O)	(mS cm ⁻¹)	(mg dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)		
S1 - 100% SC	5,0 ^{**} e ± 0,1	0,6 e ± 0,1	18,5 f ± 1,4	0,7 g ± 0,0	2,6 e ± 0,1	7,6 a ± 0,2
S2 - 75% FC + 25% VC	7,6 a ± 0,1	1,8 a ± 0,0	43,3 a ± 0,6	7,7 a ± 0,2	4,6 d ± 0,2	6,5 a ± 3,2
S3 - 75% BIO + 25% FC	3,9 g ± 0,1	1,6 b ± 0,2	36,1 b ± 0,7	1,1 d ± 0,1	11,5 b ± 0,9	1,2 b ± 0,9
S4 - 75% BIO + 25% PR	5,4 d ± 0,1	2,0 a ± 0,0	27,4 e ± 0,7	0,9 f ± 0,0	15,1 a ± 1,1	0,8 b ± 1,3
S5 - 56% FC + 25% PR + 19% VC	7,2 b ± 0,0	1,1 c ± 0,0	32,3 c ± 1,6	5,8 b ± 0,2	7,2 c ± 0,3	4,4 a ± 0,3
S6 - 56% FC + 25% PR + 19% BIO	6,8 c ± 0,0	0,8 d ± 0,2	29,6 d ± 1,4	3,2 c ± 0,2	11,4 b ± 0,3	1,5 b ± 0,3
S7 - 50% BIO + 25% PR + 25% FC	4,6 f ± 0,0	1,8 a ± 0,0	25,9 e ± 1,4	1,0 e ± 0,0	14,4 a ± 0,6	0,7 b ± 0,4

Substrato	Fe ^{2+*}	Mn ⁺	Zn ⁺	Cu ^{2+*}	Ni ²⁺	Na ⁺
	(mg dm ⁻³)					
S1 - 100% SC	91 ^{**} e ± 4	11,3 g ± 1,1	1,2 f ± 0,2	1,2 f ± 0,2	5,0 b ± 0,4	0,2 e ± 0,0
S2 - 75% FC + 25% VC	57 f ± 1	185,3 a ± 6,4	29,9 d ± 0,8	0,4 g ± 0,0	0,4 d ± 0,1	1,4 b ± 0,0
S3 - 75% BIO + 25% FC	547 d ± 15	57,0 f ± 5,9	190,2 a ± 20,0	20,4 c ± 0,4	2,9 c ± 0,6	0,4 d ± 0,0
S4 - 75% BIO + 25% PR	1.123 c ± 87	149,6 c ± 4,5	199,5 a ± 2,7	25,1 a ± 0,6	5,7 a ± 0,2	0,4 d ± 0,0
S5 - 56% FC + 25% PR + 19% VC	3.995 a ± 133	171,8 b ± 6,3	19,1 e ± 0,5	8,9 e ± 0,9	5,3 a ± 0,1	1,6 a ± 0,0
S6 - 56% FC + 25% PR + 19% BIO	3.552 b ± 149	108,5 e ± 5,0	61,5 c ± 5,7	17,9 d ± 1,0	5,7 a ± 0,2	1,3 c ± 0,0
S7 - 50% BIO + 25% PR + 25% FC	1.144 c ± 101	134,6 d ± 6,7	143,2 b ± 7,5	22,4 b ± 0,8	4,8 b ± 0,3	0,4 d ± 0,0

SC – Substrato comercial; FC - fibra de coco triturada; VC - vermicomposto; BIO - biossólido; PR - pó de rocha granítica; *Dados transformados em $\sqrt[3]{(x)}$; **Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem significativamente pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Os teores biodisponíveis de P variaram de 18,5 a 43,3 mg dm⁻³, sendo considerados baixos para todos os substratos estudados, por serem inferiores a 100 mg dm⁻³ (Tabela 4). A testemunha (S1) apresentou concentração desse nutriente inferior aos demais substratos (18,5 mg dm⁻³), enquanto a maior concentração foi observada para o substrato S2 (Tabela 4).

A biodisponibilidade de K⁺ foi superior a 0,51 cmol_c dm⁻³ para todos os substratos estudados, e, portanto, foi considerada alta nesses casos. Os teores variaram de 0,7 a 7,7 cmol_c dm⁻³, com o menor teor observado para o substrato S1 e o maior para S2, sendo esse último quase onze vezes superior ao primeiro (Tabela 4).

Com exceção do substrato S1 (100% SC), os teores biodisponíveis de Ca²⁺ foram superiores a 4,0 cmol_c dm⁻³, limite mínimo para ser considerado alto o teor desse nutriente. O teor de Ca²⁺ presente em S1 foi de 2,6 cmol_c dm⁻³, sendo considerado médio, conforme os critérios adotados no presente trabalho (Tabela 4). O maior teor desse nutriente (15,1 cmol_c dm⁻³) foi observado no substrato S4, sendo o mesmo quase seis vezes superior ao observado para S1 (Tabela 4).

De maneira geral, a elevação dos teores de Ca²⁺ nos substratos pode estar associada à presença de pó de rocha granítica e biossólido na composição dos mesmos, em detrimento aos demais materiais utilizados (Tabela 4). Isso pode ser explicado pela prática de utilização de CaO como agente lubrificante no processo de serragem de rochas ornamentais, no caso do pó de rocha granítica. No caso do biossólido, trata-se de um material naturalmente rico em nutrientes, sobretudo nitrogênio, cálcio e fósforo (MANHÃES e HOLANDA, 2008), o que pode ser refletido nos substratos produzidos.

A biodisponibilidade de Mg²⁺ variou de 0,7 a 7,6 cmol_c dm⁻³, sendo que os substratos S4 e S7 apresentaram teores considerados médios, estando estes valores entre 0,5 e 1,0 cmol_c dm⁻³, enquanto os observados nos demais substratos foram considerados altos, por serem superiores a 1,0 cmol_c dm⁻³ (Tabela 4). É notável, porém, o fato de que o substrato comercial (S1) tenha apresentado a maior concentração absoluta de Mg²⁺, ainda que esse teor tenha sido estatisticamente igual aos observados para os substratos S2 e S5, sendo esse comportamento inverso ao observado para os teores de Ca²⁺ (Tabela 4).

Os teores biodisponíveis de Fe²⁺ variaram de 57 a 3.995 mg dm⁻³ (Tabela 4), sendo todos considerados altos, uma vez que foram superiores a 45 mg dm⁻³, conforme o padrão adotado. Os substratos S5 e S6 apresentaram os maiores teores biodisponíveis desse nutriente (3.995 e 3.552 mg dm⁻³, respectivamente), seguidos de S4 e S7, cujos teores foram 1.123 e 1.144 mg dm⁻³, respectivamente (Tabela 4). Esses quatro substratos apresentavam pó de rocha granítica em suas composições, no entanto, os dois maiores teores de Fe²⁺ foram observados em substratos com maiores valores de pH [7,2 e 6,8 (Tabela 4)]. Embora altos, os teores de Fe²⁺ nos substratos S4 e S7 foram quase três vezes menores que o observado nos substratos S5 e S6, o que pode estar associado aos relativos altos valores de pH dos dois últimos substratos (7,2 e 6,8, respectivamente), em comparação com os dois primeiros (Tabela 4). Vale salientar, no entanto, que os teores de Fe²⁺ em S4 e S7 ainda são extremamente altos, tomando-se por base o limite de 45 mg dm⁻³, a partir do qual o teor desse elemento já pode ser considerado alto no solo.

Esses resultados evidenciam a importância do pó de rocha granítica como fonte de Fe²⁺ em substratos para plantas, sobretudo em condições de pH elevado, bem como o cuidado que deve se ter ao se utilizar esse tipo de material, visando evitar a toxidez por esse nutriente (CONNOLLY; GUERINOT, 2002). Essa disponibilidade pode estar relacionada ao processo de corte dos blocos de rocha, onde é utilizada a granelha de ferro como agente abrasivo, liberando assim altas quantidades desse elemento na lama produzida (MANHÃES; HOLANDA, 2008).

Os teores de Mn⁺ e Zn⁺ foram considerados médios para o substrato S1 e altos para os demais substratos (PREZOTTI et al., 2007), tendo variado de 11,3 a 185,3 mg dm⁻³ e 1,2 a

199,5 mg dm⁻³, respectivamente. O maior teor de Mn⁺ foi observado no substrato S2, seguido dos teores presentes nos substratos S5, S4, S7, S6, S3 e S1, em ordem decrescente de magnitude (Tabela 4). As duas maiores concentrações (185,3 e 171,9 mg dm⁻³) ocorreram nos substratos S2 e S5, os únicos que continham vermicomposto, e que apresentaram pH superior a 7,2 (Tabela 4). Já as concentrações de Mn⁺ nos substratos S4 e S7 eram 149,6 e 134,6 mg dm⁻³, respectivamente, sendo que ambos os substratos possuíam bio-sólido e pó de rocha granítica em composição (Tabela 4), e ambos apresentaram valores de pH inferiores a 5,5 (Tabela 4). O substrato S3 também foi produzido com uso de bio-sólido, porém, o mesmo apresentou pH 3,9, o menor dentre os substratos estudados (Tabela 4), o que pode ter influenciado na relativa baixa disponibilidade desse nutriente.

A liberação de Mn pelo processo de mineralização da matéria orgânica é favorecida sob condições de pH básico e altos teores de matéria orgânica (LUCHESE; FAVERO e LENZI, 2002). Esse processo pode ter sido determinante para a elevação do teor de Mn⁺ nos substratos S2 e S5, os quais possuíam vermicomposto em composição, um material rico em matéria orgânica, e apresentavam pH 7,6 e 7,2, respectivamente (Tabela 4).

Embora os teores de Zn⁺ tenham sido altos nos substratos estudados, por serem superiores a 2,2 mg dm⁻³, com exceção do substrato S1, notou-se forte influência de baixos valores de pH e da composição dos substratos sobre essa característica, haja vista que os três maiores valores foram observados em substratos que continham bio-sólido na composição, em percentuais superiores ou iguais a 50%, e cujos valores de pH eram relativamente baixos [3,9 (S3), 5,4 (S4) e 4,6 (S7)] (Tabela 4).

Os teores de Cu²⁺ variaram conforme os substratos, tendo oscilado entre 0,4 mg dm⁻³ (S2) e 25,13 mg dm⁻³ (S4) (Tabela 4). Por serem superiores a 1,8 mg dm⁻³, os teores de Cu presentes nos substratos S4, S5, S6 e S7 foram considerados altos, sendo que o teor foi considerado médio no substrato S1 (1,2 mg dm⁻³) e baixo no substrato S2 (0,4 mg dm⁻³). De maneira geral, os teores de Cu²⁺ foram mais elevados em substratos que continham bio-sólido em sua composição, independentemente da condição de pH do meio.

Os teores biodisponíveis de Ni variaram de 0,4 a 5,7 mg dm⁻³, sendo que os maiores valores foram observados nos substratos que continham pó de rocha granítica em sua composição e no substrato S1 (Tabela 4). Os teores de Na⁺ variaram de 0,2 a 1,6 cmol_c dm⁻³, sendo que o menor valor foi referente ao substrato S1, enquanto o maior ocorreu no substrato S5 (Tabela 4).

Os teores de Na⁺ variaram de 0,2 a 1,6 cmol_c dm⁻³, sendo o maior valor observado para o substrato S5 e o menor para o substrato S1. Dentre os materiais utilizados para a elaboração dos substratos, o pó de rocha granítica era o que possuía maior teor de sódio (716 mg kg⁻¹), enquanto a fibra de coco triturada apresentou o menor teor desse elemento (284 mg kg⁻¹) (Tabela 1). No entanto, de forma geral, os maiores teores biodisponíveis desse elemento foram observados em substratos que continham os maiores percentuais de fibra de coco em sua composição (S2, S5 e S6).

A acidez potencial, dada pela soma da concentração de H⁺ e Al³⁺, foi considerada baixa para os substratos S1, S2, S5 e S6, variando de 0,8 a 2,0 cmol_c dm⁻³, somente nesse grupo. A acidez potencial do substrato S4 foi 4,3 cmol_c dm⁻³, podendo-se considerar média, enquanto os demais substratos estudados (S3 e S7) apresentaram acidez potencial superior a 5,0 cmol_c dm⁻³, sendo, portanto, considerada alta. Dentre tais valores, apenas para S3 a acidez potencial foi formada pela presença de Al³⁺, na concentração de 0,3 cmol_c dm⁻³, sendo que a concentração de H⁺ nesse mesmo substrato (10,9 cmol_c dm⁻³) foi mais que duas vezes superior à segunda maior concentração de H⁺ (5,1 cmol_c dm⁻³), registrada no substrato S7 (Tabela 5).

Tabela 5. Valores médios e desvio padrão da concentração de hidrogênio extraível (H^+), alumínio trocável (Al^{3+}), acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), soma de bases trocáveis (S), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e) e total (T), proporção da capacidade de troca catiônica preenchida por bases trocáveis (Valor V) e percentagem de saturação por alumínio (Sat. Al) e por sódio (Sat. Na) de substratos produzidos a partir da mistura de bio sólido, fibra de coco triturada, vermicomposto e pó de rocha granítica.

Substrato	H^+ ¹	Al^{3+}	$H^+ + Al^{3+}$	S	CTC_e	T	Valor V	Sat. Al	Sat. Na
	(cmol _c dm ⁻³)						(%)		
S1 - 100% SC	2,0 d ± 0,1	0,0 b	2,0 d ± 0,1	11,1 d ± 0,2	11,1 d ± 0,2	13,1 c ± 0,2	84,8 d ± 0,3	0,0	1,6 c ± 0,2
S2 - 75% FC + 25% VC	0,8 g ± 0,1	0,0 b	0,8 f ± 0,0	20,1 a ± 3,2	20,1 a ± 3,2	20,9 b ± 3,1	96,1 a ± 0,8	0,0	6,9 b ± 1,2
S3 - 75% BIO + 25% FC	10,9 a ± 0,6	0,3 a ± 0,05	11,2 a ± 0,6	14,1 c ± 0,1	14,4 c ± 0,2	25,7 a ± 0,7	55,8 g ± 1,2	2,1 a ± 0,3	1,5 c ± 0,1
S4 - 75% BIO + 25% PR	4,3 c ± 0,1	0,0 b	4,3 c ± 0,1	17,3 b ± 0,5	17,3 b ± 0,5	21,5 b ± 0,4	80,1 e ± 0,8	0,0	1,7 c ± 0,0
S5 - 56% FC + 25% PR + 19% VC	1,2 f ± 0,1	0,0 b	1,2 e ± 0,1	19,0 a ± 0,5	19,0 a ± 0,5	20,2 b ± 0,5	94,3 b ± 0,2	0,0	8,1 a ± 0,2
S6 - 56% FC + 25% PR + 19% BIO	1,7 e ± 0,2	0,0 b	1,7 d ± 0,2	17,3 b ± 0,5	17,3 b ± 0,4	19,0 b ± 0,6	91,3 c ± 0,8	0,0	6,9 b ± 0,2
S7 - 50% BIO + 25% PR + 25% FC	5,1 b ± 0,1	0,0 b	5,1 b ± 0,1	16,5 b ± 0,2	16,5 b ± 0,2	21,6 b ± 0,1	76,5 f ± 0,3	0,0	1,9 c ± 0,1

FC - Fibra de coco triturada; VC - vermicomposto; BIO - bio sólido; PR - pó de rocha granítica; ¹Dados transformados em $\sqrt[3]{(x)}$; ²Dados transformados em $\frac{x^\lambda - 1}{\lambda}$ ($\lambda = -2$);

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade.

A soma de bases trocáveis (S) foi considerada alta em todos os substratos testados, tendo em vista que os valores superaram $5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os maiores valores desta característica foram observados para os substratos S2 e S5, os quais foram $20,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $19,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente. Por outro lado, o menor valor ($11,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi observado para o substrato S1 (Tabela 5).

Os valores de capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_e) não diferiram significativamente para os substratos S2 e S5 ($20,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $19,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente), e foram superiores aos valores observados para os demais substratos (Tabela 5). Os valores de CTC_e dos substratos S4, S6 e S7 foram $17,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $17,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $16,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, e não diferiram estatisticamente entre si. O menor valor observado para essa variável ($11,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi referente ao substrato S1 (Tabela 5). Quanto a capacidade de troca catiônica efetiva (T), foi observado que o menor valor ($13,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi referente ao substrato S1, enquanto o maior ($25,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) ocorreu para o substrato S3, sem que houvesse diferença significativa entre os valores devidos aos demais substratos estudados (Tabela 5).

A proporção da capacidade de troca catiônica preenchida por bases trocáveis (Valor V) foi considerada média (55,8%) para o substrato S3 e alta (superior a 70%) para os demais substratos estudados, sendo que o maior valor V foi referente ao substrato S2 (96,1%) (Tabela 5). O relativo baixo valor V observado para o substrato S3 pode ter sido devido à elevada acidez potencial observada para esse substrato ($11,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), ou ainda pela relativamente baixa soma de bases desse substrato ($14,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Tabela 5). Desta forma, uma prática simples de correção da acidez, como calagem, por exemplo, poderia fazer com que houvesse a redução da acidez potencial nesse substrato, elevando seu percentual de saturação por bases, melhorando substancialmente sua qualidade química.

O mesmo substrato S3 foi o único que apresentou alumínio biodisponível ($0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sendo que a saturação por esse elemento fosse de 2,1%, percentual que pode ser considerado baixo, tendo em vista que foi inferior a 20% (Tabela 5). A saturação por sódio (Sat. Na) variou de 1,5% a 8,1%, sendo que o menor valor ocorreu no substrato S3, enquanto o maior foi referente ao substrato S5 (Tabela 5). O valor de Sat. Na foi de 6,9% para os substratos S2 e S6, os quais foram superiores estatisticamente aos observados para os substratos S1, S3, S4 e S7, para os quais os valores observados foram 1,6%, 1,5%, 1,7% e 1,9%, respectivamente (Tabela 5). Para fins de distinção de horizontes e camadas de solo, a saturação por sódio é utilizada para classificação dos caracteres sódico e solódico, devendo ser superior a 15% no primeiro caso, e entre 6% e 15% no segundo. No presente estudo, os valores de Sat. Na referentes aos substratos S2, S5 e S6 representariam caráter solódico, caso se tratassem de amostras de solo.

Na Tabela 6 estão apresentados os teores pseudototais de macro e micronutrientes dos substratos estudados. Foi possível notar que os maiores teores pseudototais de N ocorreram nos substratos S2 ($25,4 \text{ g kg}^{-1}$) e S3 ($26,0 \text{ g kg}^{-1}$), sem que houvesse diferença significativa entre os mesmos. Por outro lado, os menores teores desse nutriente foram observados para os substratos S1 ($5,3 \text{ g kg}^{-1}$), S5 ($6,1 \text{ g kg}^{-1}$) e S6 ($6,5 \text{ g kg}^{-1}$), sem que os mesmos diferissem significativamente entre si, pelo teste de Skott-Knott, a 5% de probabilidade (Tabela 6).

Tabela 6. Médias e desvio padrão de teores pseudototais de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) de substratos formulados com fibra de coco triturada, bio sólido, vermicomposto e pó de rocha granítica.

Substratos	N	P	K ¹	Ca ¹	Mg	Fe ²
	(g kg ⁻¹)					
S1 - 100% SC	5,3* d ± 1,13	2,1 f ± 0,14	0,8 d ± 0,08	2,2 c ± 0,63	4,4 b ± 0,20	13,0* e ± 0,6
S2 - 75% FC + 25% VC	25,4 a ± 1,00	26,0 b ± 0,51	6,7 a ± 0,21	13,4 a ± 0,34	5,7 a ± 0,21	3,7 f ± 0,1
S3 - 75% BIO + 25% FC	26,0 a ± 1,61	31,7 a ± 0,39	0,3 g ± 0,01	11,4 a ± 0,61	2,2 c ± 0,25	22,3 d ± 0,2
S4 - 75% BIO + 25% PR	16,3 b ± 0,43	22,5 c ± 0,34	0,5 f ± 0,01	10,4 b ± 0,55	4,2 b ± 0,30	44,2 b ± 0,3
S5 - 56% FC + 25% PR + 19% VC	6,1 d ± 1,20	16,2 e ± 2,26	6,0 b ± 0,25	14,4 a ± 0,34	6,1 a ± 0,11	36,5 c ± 0,9
S6 - 56% FC + 25% PR + 19% BIO	7,5 d ± 0,48	17,0 e ± 0,64	2,7 c ± 0,05	13,5 a ± 0,51	3,8 b ± 0,01	36,9 c ± 1,0
S7 - 50% BIO + 25% PR + 25% FC	13,2 c ± 1,65	19,6 d ± 0,50	0,6 e ± 0,01	12,4 a ± 0,77	6,0 a ± 0,70	52,7 a ± 1,1

Substratos	Mn ²	Al	Na	Zn ²	Cu ²	Ni ²
	(g kg ⁻¹)			(mg kg ⁻¹)		
S1 - 100% SC	0,09 f ± 0,01	65,98 c ± 1,57	270 e ± 5	19 g ± 1	22 f ± 1	338 b ± 27
S2 - 75% FC + 25% VC	10,61 a ± 0,28	6,28 f ± 0,20	417 c ± 23	2.127 b ± 57	381 c ± 8	42 c ± 6
S3 - 75% BIO + 25% FC	0,19 e ± 0,01	70,53 a ± 1,55	201 f ± 14	615 d ± 18	268 d ± 9	19 e ± 0
S4 - 75% BIO + 25% PR	0,40 d ± 0,01	65,45 c ± 1,61	243 e ± 3	454 e ± 5	225 e ± 23	27 d ± 4
S5 - 56% FC + 25% PR + 19% VC	7,69 b ± 0,29	10,57 e ± 0,14	702 a ± 49	1.271 c ± 44	1.223 b ± 51	543 a ± 19
S6 - 56% FC + 25% PR + 19% BIO	5,78 c ± 0,33	14,98 d ± 0,38	503 b ± 10	2.809 a ± 193	1.556 a ± 68	548 a ± 31
S7 - 50% BIO + 25% PR + 25% FC	0,45 d ± 0,02	68,05 b ± 0,70	345 d ± 15	379 f ± 18	199 e ± 11	28 d ± 2

SC – Substrato comercial; FC - fibra de coco triturada; VC - vermicomposto; BIO - bio sólido; PR - pó de rocha granítica; ¹Dados transformados em $\sqrt[3]{(x)}$; ²Dados transformados em $\sqrt{(x)}$; e *Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Ficou evidente que os maiores teores de N ocorreram nos substratos que continham biossólido, vermicomposto ou ambos em sua composição. Isso pode ser explicado pelo fato de que, dentre os materiais utilizados na formulação dos substratos, os mais ricos em N foram biossólido (34,8 g kg⁻¹) e vermicomposto (34,9 g kg⁻¹), contrastando com fibra de coco e o pó de rocha granítica, os quais possuíam respectivamente apenas 6,8 g kg⁻¹ e 0,7 g kg⁻¹ de N em sua constituição. Além disso, a relativa baixa capacidade de elevação dos teores de N dos substratos pela adição da fibra de coco pode estar associada ao fato desse material apresentar alta relação C/N, sendo rico em celulose e lignina (ABAD et al., 2002).

Os teores pseudototais de P nos substratos variaram de 2,1 g kg⁻¹ a 31,7 g kg⁻¹, sendo que o menor valor foi observado para o substrato S1, enquanto o maior em S3 (Tabela 6). De maneira geral, os maiores teores foram observados nos substratos formulados sem o uso de pó de rocha granítica (S2 e S3), com exceção do substrato comercial (S1). Por outro lado, os substratos que continham esse material em sua composição (S4, S5, S6 e S7) apresentaram os menores teores desse nutriente (Tabela 6). Isso pode ter ocorrido em função da característica química dos materiais, já que o teor de P no pó de rocha granítica era 13,1 g kg⁻¹, enquanto no biossólido e vermicomposto era 31,2 g kg⁻¹ e 34,5 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 1).

Embora o teor pseudototal de P no substrato S3 tenha sido o maior dentre os substratos testados, a biodisponibilidade desse nutriente não foi maior para esse substrato, mas sim para o substrato S2 (Tabela 4). Isso pode estar relacionado ao baixo pH (3,9) e à presença de Al⁺³ em S3, na concentração de 0,3 cmol_c dm⁻³ (Tabela 4), o que pode ter facilitado a precipitação de P sob a forma de Al(OH)₂H₂PO₄ (LUCHESE; FAVERO e LENZI, 2002), reduzindo a biodisponibilidade em S3.

A concentração de K nos substratos variou de 0,3 a 6,7 g kg⁻¹, sendo o menor valor observado substrato S3, enquanto o maior era referente ao substrato S2 (Tabela 6). Chamou atenção o fato de que os teores pseudototais de K foram iguais ou superiores a 6,0 g kg⁻¹ apenas para os substratos produzidos com o uso de vermicomposto (S2 e S5), ao passo que o substrato S6 apresentou a terceira maior concentração de K, dentre os substratos estudados (2,7 g kg⁻¹). Esses resultados sugerem que o vermicomposto foi a principal fonte de K para os substratos formulados, o que pode ser explicado pela própria concentração desse nutriente nesse material (6,4 g kg⁻¹), a qual foi a maior dentre os materiais utilizados para a formulação dos substratos (Tabela 1).

Os teores pseudototais de Ca variaram entre os substratos testados, sendo que a maior diferença se entre o substrato comercial, no qual o teor de Ca foi de 2,2 g kg⁻¹, e os demais, cujos teores variaram de 10,4 g kg⁻¹ (S4) e 14,4 g kg⁻¹ (S5) (Tabela 6). De forma geral, o substrato S1 apresentou o menor teor de Ca, seguido pelo substrato S4, enquanto os teores presentes nos demais substratos não diferiram significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade (Tabela 6). Tal situação pode ter ocorrido pelo fato de que, com exceção da fibra de coco triturada, cuja concentração de Ca era 7,0 g kg⁻¹, os demais materiais utilizados para a confecção dos substratos apresentavam concentrações de Ca similares, variando de 14,5 g kg⁻¹ (biossólido e pó de rocha granítica) a 15,2 g kg⁻¹ (vermicomposto) (Tabela 1).

Os teores de Mg variaram de 2,2 g kg⁻¹ a 6,1 g kg⁻¹, sendo os maiores valores referentes aos substratos S2, S5 e S7 (5,7; 6,1; e 6,0 g kg⁻¹, respectivamente). Por outro lado, o menor valor (2,2 g kg⁻¹) foi referente ao substrato S3 (Tabela 6). Esses resultados ocorreram provavelmente devido à concentração de Mg nos constituintes dos substratos, uma vez que os teores foram 2,3 g kg⁻¹ (biossólido), 1,4 g kg⁻¹ (fibra de coco triturada), 6,2 g kg⁻¹ (pó de rocha granítica) e 6,8 g kg⁻¹ (vermicomposto) (Tabela 1).

Os teores de Fe variaram de 3,7 a 52,7 g kg⁻¹, sendo esses valores referentes aos substratos S2 e S7, respectivamente (Tabela 6). De maneira geral, os maiores teores de Fe foram observados nos substratos que continham pó de rocha granítica em sua composição (S4, S5, S6

e S7), os quais foram superiores a 36,5 g kg⁻¹ (Tabela 6). Da mesma forma, os teores biodisponíveis de Fe nesses substratos foram superiores aos demais [entre 1.123 e 3.995 cmol_c dm⁻³ (Tabela 4)]. Tais resultados tornam evidente que o uso de pó de rocha granítica em substratos elevou consideravelmente os teores de Fe, o que pode ser explicado pelo emprego de granalha de ferro no corte de blocos de granito e outros tipos de rochas ornamentais, tornando-o importante fonte desse elemento (MANHÃES e HOLANDA, 2008). No entanto, deve-se avaliar os níveis desse elemento nos substratos, haja vista a possibilidade de toxidez às plantas (CONNOLLY e GUERINOT, 2002).

Os teores pseudototais de Mn variaram de 0,09 a 10,61 g kg⁻¹, sendo o menor teor referente ao substrato comercial (S1) e o maior ao substrato S2 (Tabela 6). De forma geral, observou-se que os substratos S2 e S5, os únicos que possuíam vermicomposto em sua composição (25% e 19%, respectivamente), apresentaram as duas maiores concentrações desse elemento [10,61 g kg⁻¹ e 7,69 g kg⁻¹, respectivamente (Tabela 6)], tornando evidente a capacidade de adição desse elemento pelo uso de vermicomposto. Vale destacar que o vermicomposto foi o material que apresentou o maior teor de Mn dentre os materiais utilizados [14,8 g kg⁻¹ (Tabela 1)], enquanto o pó de rocha granítica, o qual possuía a segunda maior concentração desse elemento, continha somente 7,6 g kg⁻¹ de Mn (Tabela 1). Esse nutriente essencial é requerido para a atividade de algumas desidrogenases, descarboxilases, quinases, oxidades e peroxidases, além de estar envolvido com outras enzimas ativadas por cátions e na evolução fotossintética do O₂ (TAIZ et al., 2017), entretanto não é requerido em grandes quantidades pelas plantas. Tal qual os teores pseudototais, os teores biodisponíveis de Mn também foram menores no substrato S1 [11,3 mg dm⁻³ (Tabela 4)] e maiores no substrato S2 [185,3 mg dm⁻³ (Tabela 4)]. Entretanto, a razão entre esses teores foi 1:118 (pseudototal) e 1:16 (biodisponível), demonstrando que a biodisponibilidade de nutrientes nem sempre é diretamente relacionada com o teor presente nos materiais utilizados como substratos.

Embora os teores pseudototais de Al tenham sido relativamente elevados [6,28 g kg⁻¹ a 70,53 g kg⁻¹ (Tabela 6)], apenas para o substrato S3, que apresentou o maior teor pseudototal de Al, foi observado Al³⁺ em solução [0,3 cmol_c dm⁻³ (Tabela 5)], indicando que, somente para esse substrato o teor de Al poderia representar problemas para plantas, mesmo assim, se não se lançasse mão de medidas corretivas, como calagem.

Os teores pseudototais de Na variaram de 201 mg kg⁻¹ (S3) a 702 mg kg⁻¹ (S5) (Tabela 6), sendo que a saturação de Na⁺ em ambos os substratos foram 1,5% (S3) e 8,1% (S5) (Tabela 5). Um dos problemas advindos do excesso de íons no solo ou substrato é a salinidade, em que, ao menos que as plantas disponham de certas adaptações a essa condição, podem limitar seu crescimento (TAIZ et al., 2017). No entanto, o Na está envolvido na regeneração do fosfoenolpiruvato em plantas C4 e CAM (metabolismo ácido das crassuláceas), sendo também capaz de substituir o K em algumas funções nas plantas (TAIZ et al., 2017).

Os teores pseudototais de Zn variaram de 19 mg kg⁻¹ (S1) a 2.809 mg kg⁻¹ (S6) (Tabela 6). A biodisponibilidade desse nutriente não seguiu esse padrão, já que os maiores teores (190,2 mg dm⁻³ e 199,5 mg dm⁻³) foram referentes aos substratos S3 e S4, respectivamente. Dentre os materiais utilizados na confecção dos substratos, o que apresentou maior teor de Zn foi o biossólido (13.173 mg kg⁻¹), seguido de vermicomposto (2.808 mg kg⁻¹), pó de rocha granítica (1.196 mg kg⁻¹) e fibra de coco triturada (11 mg kg⁻¹) (Tabela 1).

Os teores de Cu variaram de 22 mg kg⁻¹ a 1.556 mg kg⁻¹ (Tabela 6). O menor teor foi referente ao substrato S1, enquanto os dois maiores observados (1.223 mg kg⁻¹ e 1.556 mg kg⁻¹), foram referentes aos substratos S5 e S6, respectivamente. Em comparação com os teores biodisponíveis, tal ordem de magnitude não foi mantida, tendo em vista que a menor concentração de Cu²⁺ (0,4 mg dm⁻³) foi referente ao substrato S2, enquanto a maior (25,1 mg dm⁻³) se referiu ao substrato S4 (Tabela 1).

Os teores pseudototais de Ni variaram de 19 mg kg⁻¹ a 548 mg kg⁻¹ (Tabela 6). De maneira geral, foram observados dois conjuntos de substratos com magnitudes de teores distintos: o primeiro, formados pelos substratos S2, S3, S4 e S7, cujos teores de Ni variaram de 19 mg kg⁻¹ a 42 mg kg⁻¹; e o segundo grupo, formado pelos substratos S1, S5 e S6, cujos teores de Ni variaram de 338 mg kg⁻¹ a 548 mg kg⁻¹ (Tabela 6).

Não foi observada a presença de Pb nos substratos S1 e S5, tendo os teores pseudotais variado de 41,45 mg kg⁻¹ a 210,93 mg kg⁻¹ para os demais substratos estudados (Tabela 7). O maior teor observado, que foi quase três vezes superior ao segundo maior teor de Pb (75,21 mg kg⁻¹), foi referente ao substrato S6.

Tabela 7. Médias e desvio padrão de teores pseudototais de Pb e Cd de substratos formulados com fibra de coco triturada, biossólido, vermicomposto e pó de rocha granítica.

Substrato	Pb	Cd
	(mg kg ⁻¹)	
S1 - 100% SC	0,00 e ± 0,00	0,03 d ± 0,03
S2 - 75% FC + 25% VC	56,44 c ± 15,98	4,37 a ± 0,38
S3 - 75% BIO + 25% FC	75,21 b ± 0,97	1,20 b ± 0,05
S4 - 75% BIO + 25% PR	56,25 c ± 5,43	0,69 c ± 0,08
S5 - 56% FC + 25% PR + 19% VC	0,00 e ± 0,00	0,00 d ± 0,00
S6 - 56% FC + 25% PR + 19% BIO	210,93 a ± 4,70	0,00 d ± 0,00
S7 - 50% BIO + 25% PR + 25% FC	41,45 d ± 4,65	0,46 c ± 0,03

CV – Coeficiente de variação; SC – substrato comercial; FC - fibra de coco triturada; VC - vermicomposto; BIO - biossólido; PR - pó de rocha granítica; *Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade.

Os substratos S5 e S6 não apresentaram Cd em sua composição, enquanto os teores presentes nos demais substratos variaram de 0,03 mg kg⁻¹ (S1) a 4,37 mg kg⁻¹ (S2) (Tabela 7).

A Resolução n° 375, de 29 de agosto de 2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (CONAMA, 2006) define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodo de esgoto, dentre os quais estão os limites de determinados elementos químicos no próprio lodo ou nos produtos derivados. As concentrações máximas permitidas de alguns elementos nesses materiais são: 39 mg kg⁻¹ (Cádmio); 300 mg kg⁻¹ (Chumbo); 1.500 mg kg⁻¹ (Cobre); 420 mg kg⁻¹ (Níquel); e 2.800 mg kg⁻¹ (Zinco). Dentre os substratos testados no presente estudo, S3, S4, S6 e S7 devem ser analisados à luz da referida norma, por conterem biossólido em sua composição. Nesse sentido, nenhum desses substratos apresentaram teores de Cd e Pb superiores ao definido na referida legislação. No entanto, o substrato S6 apresentou teores pseudototais de Zn (2.809 mg kg⁻¹), Cu (1.556 mg kg⁻¹) e Ni (548 mg kg⁻¹) superiores aos limites estabelecidos nessa legislação, e, portanto, não poderia ser utilizado para fins agrícolas, não possuindo utilização segura na agricultura.

A Instrução Normativa n° 05, de 10 de março de 2016 (MAPA, 2016) estabelece critérios para classificação de substratos para plantas, em função dos tipos de material utilizados em sua composição, incluindo a presença ou não de biossólido nos mesmos. Nesse sentido, os substratos S1 e S2 podem ser classificados como “Classe A”, uma vez que são substratos que utilizam em sua produção matéria prima de origem vegetal ou de processamentos da agroindústria isentos de despejos sanitários, onde não são utilizados no processo metais pesados e outros elementos tóxicos, podendo ser considerados de utilização segura na agricultura (MAPA, 2016). O substrato S5 pode ser enquadrado como “Classe B”, já que é seguro para uso na agricultura, por utilizar em sua composição matéria prima oriunda de processamento da atividade industrial ou da agroindústria isentos de despejos sanitários, sem utilização de metais

pesados e outros elementos potencialmente tóxicos nesse processo (MAPA, 2016). Por fim, os substratos S3, S4 e S7 podem ser enquadrados como de “Classe D”, já que os mesmos contém material (biossólido) oriundo do tratamento de despejos sanitários, e possuem utilização segura na agricultura, conforme critérios estabelecidos na Resolução CONAMA n° 375/2006 (CONAMA, 2006), conforme discutido anteriormente. Por esse critério, o substrato S6 não apresenta utilização segura na agricultura, logo não possui classificação no âmbito da IN 05/2016 (MAPA, 2016).

A Instrução Normativa DAS N° 27, de 05 de julho de 2006 (IN 27/2006), republicada em 02/05/2016 (MAPA, 2006), estabelece limites máximos aceitáveis de contaminantes em substratos para plantas, os quais deve ser de até 20 mg kg⁻¹ (Arsênio); 8 mg kg⁻¹ (Cádmio); 300 mg kg⁻¹ (Chumbo); 500 mg kg⁻¹ (Cromo); 2,5 mg kg⁻¹ (Mercúrio); 175 mg kg⁻¹ (Níquel); e 80 mg kg⁻¹ (Selênio). Comparando-se com o disposto na Resolução CONAMA n° 375/2006, é possível notar que a referida Resolução é mais branda do que a IN 27/2006, no que diz respeito aos teores máximos de Cd e Ni nos substratos para plantas. Desta maneira, considerando os níveis máximos de Cd, Pb e Ni permitidos em substratos para plantas, definidos pela IN 27/2006, observou-se que nenhum dos substratos estudados apresentou restrição quanto aos teores de Cd e Pb (Tabela 7). No que se refere aos teores pseudototais de Ni, no entanto, verificou-se que os substratos S1, S5 e S6 apresentaram teores superiores ao definido na legislação em discussão (Tabela 6), sendo cerca de 1,9 (S1); 3,2 (S5); e 3,2 (S6) vezes maior que esse limite.

Considerando o somatório dos teores pseudototais e biodisponíveis de P, K, Ca, Mg e Na, notou-se que o substrato S1 apresentou os menores teores relativos (19% e 47%, respectivamente) dentre os substratos testados, tendo como referência o substrato S2, o qual apresentou os maiores somatórios de teores dentre os substratos testados, para ambos os tipos de análises. De maneira geral, os dois substratos com menores valores de pH [3,9 (S4) e 4,6 (S7)] apresentaram as maiores reduções relativas de biodisponibilidade de nutrientes, sendo 9% e 8%, respectivamente, a diferença entre os percentuais de teores pseudototais e biodisponíveis de nutrientes (P, K, Ca, Mg e Na). Por outro lado, a maior biodisponibilidade relativa (28%) foi observada para o substrato S1, indicando que, a maior parte dos nutrientes presentes nesse substrato (teor pseudototal) é disponibilizada para as plantas (teor biodisponível).

3.6 CONCLUSÕES

A capacidade de retenção de água a 10 hPa (CRA_{10}) de substratos formulados com pó de rocha granítica, biossólido, fibra de coco triturada e/ou vermicomposto pode ser reduzida em até 70%, em comparação com substrato comercial à base de musgo esfagno e vermiculita.

O uso de biossólido e pó de rocha granítica contribui para a elevação da densidade de substratos produzidos, chegando a ser cerca de 3,7 vezes superior ao observado para o substrato comercial à base de musgo esfagno e vermiculita.

O substrato produzido com uso de 75% de fibra de coco triturada e 25% de vermicomposto (v/v) apresenta elevado espaço de aeração, entretanto, sem apresentar elevada capacidade de retenção de água.

O substrato composto por 75% de biossólido e 25% de pó de rocha granítica (v/v), apresenta elevados teores biodisponíveis de P, Ca, Fe, Zn e Cu.

4 CAPÍTULO II

CRESCIMENTO DE PLANTAS DE PIMENTA DO REINO, CV. BRAGANTINA, SOB DIFERENTES REGIMES DE IRRIGAÇÃO E SUBSTRATOS

4.1 RESUMO

O uso de substratos adequados e o manejo da irrigação são medidas importantes para a produção de mudas de pimenta do reino aceitáveis, visando o plantio em campo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de diferentes regimes de irrigação (RI) e substratos no crescimento de mudas de pimenta do reino (*Piper nigrum L.*), cv. Bragantina. Para isso, mudas pré-enraizadas foram cultivadas por 120 dias em tubetes com capacidade de 290 cm³, preenchidos com três substratos, obtidos pela mistura de bio-sólido (BIO), fibra de coco triturada (FC) e pó de rocha granítica (PR), nas seguintes formulações, em percentual de volume: BF – 75% BIO + 25% FC; BP – 75% BIO + 25% PR; e BFP – 50% BIO + 25% FC + 25% PR. Foram avaliados cinco RIs, equivalentes a 36 (RI 36), 55 (RI 55), 85 (RI 85), 100 (RI 100) e 126% (RI 126) da lâmina referência. Esta lâmina, por sua vez, era referente a demanda hídrica de plantas cultivadas submetidas a BF e RI 100, sob irrigação automatizada. Aos 120 dias após o transplantio (DAT) avaliou-se comprimento da haste principal (H), número de folhas (NF), acúmulo de matéria seca em parte aérea (MSPA) e sistema radicular (MSR), índice de área foliar (IAF), teores de clorofila *a* (CLa) e *b* (CLb) e eficiência no uso da água (EUA). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 5 (substratos x RI), com dez repetições. Os volumes de água aplicados via sistema de irrigação variaram de 0,282 (RI 36) a 0,988 L planta⁻¹ (RI 126). Houve efeito significativo ($p < 0,05$) dos RI's sem influência de substrato sobre H, MSPA e EUA; de substratos, independente de RI, sobre H e MSR; e da interação sobre IAF, NF, CLa e CLb. Os valores de H, MSPA, IAF e NF variaram linear e positivamente, conforme os RI's, entretanto, para IAF e NF as variações ocorreram de formas distintas em função dos substratos. Plantas sob BFP apresentaram H igual 18,9 cm, cujo valor foi cerca de 15% superior ao observado para BP e 13% superior a BF. Em plantas cultivadas com BP, os maiores valores de CLa e CLb ocorreram sob RI 36 e RI 126. Entre RI 100 e RI 126 ocorreu aumento de CLa e CLb para BP (9% e 24%, respectivamente), e redução para BFP (27 e 67%, respectivamente) e BF (22 e 32%, respectivamente). Sob RI 126, plantas submetidas a BFP apresentaram IAF cerca de 23% superior às cultivadas com BP, e 44% superior a BF. A EUA variou linear e negativamente conforme os RI's, num intervalo de 3,02 a 5,86 kg de matéria seca por m⁻³ de água. O substrato composto por bio-sólido e fibra de coco triturada (3:1, v/v), apresenta restrições químicas, principalmente pH baixo, as quais, podem comprometer seu uso para a produção de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina. A produção de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, com alturas iguais ou superiores a 20 cm e seis ou mais folhas, é possível com o uso de substrato composto por bio-sólido, fibra de coco tritura e pó de rocha granítica (2:1:1, v/v), desde que o suprimento hídrico não seja inferior a 85% da necessidade hídrica das plantas. Restrição de até 15% da necessidade hídrica de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, não representam impactos negativos sobre a eficiência de uso da água.

Palavras-chave: Manejo da irrigação. Meio de cultivo. *Piper nigrum L.*

4.2 ABSTRACT

The use of suitable substrates and irrigation management are important measures for the production of acceptable black pepper seedlings, aiming at planting in the field. The objective of this work was to evaluate the effects of different irrigation regimes (IR) and substrates on the growth of black pepper seedlings (*Piper nigrum* L.), cv. Bragantina. For this, pre-rooted seedlings were grown for 120 days in pots with a capacity of 290 cm³, filled with three substrates, obtained by mixing biosolid (BIO), crushed coconut fiber (CF) and granite rock powder (GR), in following formulations, in percentage of volume: BF - 75% BIO + 25% CF; BP - 75% BIO + 25% GR; and BFP - 50% BIO + 25% CF + 25% GR. Five IRs were evaluated, equivalent to 36 (IR 36), 55 (IR 55), 85 (IR 85), 100 (IR 100) and 126% (IR 126) of the reference depth. This depth, in turn, was related to the water demand of cultivated plants submitted to BF and IR 100, under automated irrigation. At 120 days after transplanting (DAT), the length of the main stem (H), number of leaves (NL), accumulation of dry matter in the aerial part (DMAP) and root system (DMRS), leaf area index (LAI), chlorophyll a (CHLa) and b (CHLb) indexes and water use efficiency (WUE). The experimental design was completely randomized, in a 3 x 5 factorial scheme (substrates x IR), with ten replications. The volumes of water applied by the irrigation system ranged from 0.282 (IR 36) to 0.988 L plant⁻¹ (IR 126). There was a significant effect ($p < 0.05$) of the IRs without influence of substrate on H, DMAP and WUE; substrates, independent of IR, on H and DMRS; and the interaction on LAI, NL, CHLa and CHLb. The values of H, DMAP, LAI and NL varied linearly and positively, according to the IRs, however, for LAI and NL the variations occurred in different ways depending on the substrates. Plants under BFP showed H equal to 18.9 cm, whose value was about 15% higher than that observed for BP and 13% higher than BF. In plants grown with BP, the highest values of CHLa and CHLb occurred under IR 36 and IR 126. Between IR 100 and IR 126 there was an increase in CHLa and CHLb for BP (9% and 24%, respectively), and reduction for BFP (27 and 67%, respectively) and BF (22 and 32%, respectively). Under IR 126, plants submitted to BFP show LAI about 23% higher than those grown with BP, and 44% higher than BF. The WUE varied linearly and negatively according to the IRs, in a range of 3.02 to 5.86 kg of dry matter per m⁻³ of water. The substrate composed of biosolids and crushed coconut fiber (3:1, v/v), has chemical restrictions, mainly low pH, which may compromise its use for the production of black pepper seedlings, cv. Bragantina. The production of black pepper seedlings, cv. Bragantina, with heights equal to or greater than 20 cm and six or more leaves, is possible with the use of a substrate composed of biosolids, coconut fiber grinds and granitic rock powder (2:1:1, v/v), provided that the water supply is not less than 85% of the water requirement of the plants. Restriction of up to 15% of the water requirement of black pepper plants, cv. Bragantina, do not represent negative impacts on WUE.

Key words: Irrigation schedule. Pot mixing. *Piper nigrum* L.

4.3 INTRODUÇÃO

A pimenta do reino (*Piper nigrum* L.), também conhecida como pimenta negra, é uma trepadeira pertencente à família *Piperaceae*, bem adaptada às condições de clima subtropical úmido (KRISHNAMURTHY et al., 2016; ZU et al., 2016), e que apresenta importância mundial, tendo em vista a possibilidade de uso em diversas áreas (SHITYAKOV et al., 2019; TAKOORE et al., 2019).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial, sendo superado apenas por Indonésia e Vietnã (FAO, 2019). Em 2017 foram produzidas 46.899 Mg de pimenta do reino no Brasil, provenientes principalmente do Pará e Espírito Santo, cujas produções foram equivalentes a 48,5 e 45,8%, respectivamente, do total produzido no país (IBGE, 2019).

As principais regiões produtoras nestes dois Estados apresentam características distintas quanto ao clima. Na mesorregião Nordeste Paraense os regimes de precipitação são caracterizados pela concentração de chuvas entre dezembro e maio, quando chove em média 1.766 mm, que corresponde a 77% do total de chuvas no ano agrícola (MORAES et al., 2005). No Espírito Santo, a maior parte dos cultivos localiza-se na porção Norte do estado, principalmente em São Mateus, Jaguaré e Vila Valério (IBGE, 2019). Conforme dados disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP, mantido pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, entre 1971 e 2019, na estação meteorológica de São Mateus (83550) foram registradas temperaturas médias anuais de 24,2°C, déficit hídrico médio de 277 mm, com chuvas concentradas no período outubro/abril, período em que ocorre cerca de 77% do total precipitado ao ano (1.216,6 mm) (INMET, 2020).

Por ser considerada uma cultura sensível ao estresse hídrico (KRISHNAMURTHY et al., 2016) são necessários estudos acerca da demanda hídrica destas plantas sob as condições brasileiras, visando à definição das melhores estratégias de suprimento hídrico em todas as suas fases de desenvolvimento. Entretanto, ainda são escassos estudos neste sentido disponíveis no Brasil.

Além da falta de informações sobre a necessidade hídrica da cultura, um grave problema enfrentado por produtores de pimenta do reino no Brasil é a ocorrência da fusariose, doença restrita ao território nacional, causada pelo fungo de solo *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (ALBUQUERQUE; FERRAZ, 1976), para a qual ainda não existe controle químico eficaz ou cultivar resistente registrada no Brasil (BENCHIMOL et al., 2017; CASTRO et al., 2016; ROCHA et al., 2016). Em função disso, são recomendadas medidas preventivas para o controle da doença, como por exemplo produção de mudas isentas do fitopatógeno (VENTURA; COSTA, 2004).

O controle da fusariose é dificultado pelo fato de seu agente causal apresentar capacidade de sobrevivência em restos culturais e de produção de estruturas de resistência no solo (SUMMERELL; LESLIE, 2011), dificultando sua eliminação de sistemas agrícolas. Em função disso, o uso de solo na composição de substratos para a produção de mudas de pimenta do reino deve ser evitado, o que reduz de forma considerável a chance de contaminação dos estandes de produção de mudas.

Diante disso, o uso de substratos isentos de solo para a produção de mudas de pimenta do reino, em detrimento ao uso solo, pode proporcionar diversos benefícios, os quais transcendem a menor probabilidade de existir patógenos de planta nos primeiros, podendo-se destacar o aumento na disponibilidade de água (SCHINDLER; LISCHIED e MÜLLER, 2017), no controle da disponibilidade de nutrientes (SILBER, 2008). Além disso, o uso de substratos pode ser considerado alternativa de uso de resíduos potencialmente poluidores do meio

ambiente (ABREU et al., 2017a; PARADELO et al., 2016). Não entanto, considerando que geralmente os resíduos são isentos de padrões para seu reaproveitamento, torna-se importante a caracterização dos substratos formulados com tais materiais, incluindo sua interação com as plantas cultivadas, antes da recomendação de utilização pelo produtor rural.

Face ao exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de utilização de substratos isentos de solo formulados com biossólido, fibra de coco triturada e pó de rocha granítica, através do desenvolvimento de mudas de pimenta do reino, cultivar Bragantina, submetidas a diferentes regimes de irrigação.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido entre março e julho de 2018 no Campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, localizado em Seropédica-RJ (22° 45' 49,41" S e 43° 41' 50,77" - 33 m de altitude), em uma casa de vegetação instalada no sentido Leste-Oeste. O clima local foi classificado como tropical chuvoso e chuvas de verão, tipo Aw, conforme a classificação de Köppen, ocorrendo concentração das chuvas no período outubro-março e temperatura média anual de 24,5 °C (BARROS et al., 2009).

Foram utilizadas mudas de pimenta do reino, *cv.* Bragantina, pré-enraizadas por 60 (sessenta) dias em canteiros com areia, obtidas a partir de estacas com um nó e uma folha, coletadas de plantas com três anos de idade em uma propriedade situada em São Mateus, região Norte do Espírito Santo. Antes do plantio, as estacas foram imersas em solução fungicida à base de carbendazim (2 g p.c.L⁻¹) por cinco minutos, secas à sombra por 30 minutos e submetidas à aplicação de ácido indol-butírico diluído a 5.000 mg kg⁻¹ de pó inerte, aplicado na base das mesmas (SECUNDINO et al., 2014).

O transplântio ocorreu em 05/03/2018, quando as plantas foram repicadas para tubetes cilíndricos de polipropileno, comumente utilizados para a produção de mudas florestais, com capacidade de 290 cm³ (Florestal Plast, Londrina/PR), preenchidos com três substratos isentos de solo, obtidos a partir das seguintes misturas: BF - biossólido (BIO) e fibra de coco triturada (FC), na proporção 3:1 (v/v); BP - BIO e pó de rocha granítica (PR), na proporção 3:1 (v/v); e BFP - BIO, FC e PR, na proporção 2:1:1 (v/v). Os tubetes foram instalados em bandejas de polipropileno com 54 células (58,2 cm x 41,0 cm), posicionadas sobre bancadas de ferro a uma altura de 0,8 m em relação do piso da casa de vegetação. A densidade de plantas final foi de 68 plantas por m².

O biossólido utilizado foi fornecido pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE), e é obtido pela estabilização do lodo produzido durante o processo de tratamento de esgoto na ETE localizada na Ilha do Governador, município do Rio de Janeiro. A fibra de coco utilizada consistiu do produto comercial Golden Mix granulada, Tipo 1 (Amafibra, Artur Nogueira/SP). O pó de rocha granítica foi fornecido pela empresa Caeté Mármore e Granitos, e é proveniente do processo de beneficiamento primário de blocos de granito pelo método tear, com uso de solução abrasiva, o qual pertence a Classe IIA - Não Perigoso - Não Inerte, conforme NBR 10004 (MANHÃES; HOLANDA, 2008).

Na Tabela 8 estão apresentadas as características químicas biodisponíveis, bem como os valores de densidade volumétrica em base seca (Ds) e porosidade total (Pt) dos substratos formulados.

Tabela 8. Características químicas e físicas iniciais de substratos utilizados no cultivo de mudas de pimenta do reino.

Substrato	pH (H ₂ O)	CE (mS cm ⁻¹)	N	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
			(mg kg ⁻¹)	(mg dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)			
75% BIO + 25% FC	3,9	1,6	26,0	36,1	1,1	11,5	1,2	0,4
75% BIO + 25% PR	5,4	2,0	16,3	27,4	0,9	15,1	0,8	0,4
50% BIO + 25% FC + 25% PR	4,6	1,8	13,2	25,9	1,0	14,4	0,7	0,4
Substrato	Al	H+Al	S	CTC	T	V	Ds	PT
	(cmol _c dm ⁻³)					(%)	(g cm ⁻³)	(%)
75% BIO + 25% FC	0,3	11,2	14,1	14,4	25,7	55,8	0,6	61,4
75% BIO + 25% PR	0,0	4,3	17,3	17,3	21,5	80,1	0,8	63,1
50% BIO + 25% FC + 25% PR	0,0	5,1	16,5	16,5	21,6	76,5	0,5	72,9

CE – Condutividade elétrica; BIO - biossólido; FC – fibra de coco triturada; PR – pó de rocha granítica; CE – condutividade elétrica; V – saturação por bases; CTC – Capacidade de troca de cátions efetiva; T – capacidade de cátions total; e S – soma de bases trocáveis.

Os tratamentos referentes aos regimes de irrigação foram aplicados fazendo-se o uso de um sistema de microirrigação por gotejamento, dotado de emissores autocompensantes (marca Netafim, modelo PCJ) com vazões de 1,4; 2,1; 3,3; 3,9 e 4,9 L h⁻¹. Essas vazões foram aferidas em teste de desempenho do sistema, executado sob pressão de serviço de 6 (seis) mca, no qual foi verificado coeficiente de uniformidade de distribuição de 93,9% e coeficiente de uniformidade de Christianssen igual a 96,0%.

O manejo da irrigação durante todo o experimento foi realizado de forma automatizada, mediante uso de acionadores simplificados de irrigação - ASI (Medici et al., 2010), instalados em duas plantas de referência, as quais receberam água a uma taxa de 3,9 L h⁻¹ e foram cultivadas com uso do substrato BF. O manejo de irrigação aplicado às plantas submetidas a estes tratamentos foi realizado a uma tensão de 4 kPa, dada pelo desnível de 40 (quarenta) centímetros entre o centro da capsula porosa, instalada a 5 cm, contados a partir da superfície dos substratos, e o centro do sensor mecânico de nível (pressostato). Desta forma, a demanda hídrica deste conjunto de plantas foi definida como a lâmina de irrigação de referência (LIR), empregado ao longo de todo o experimento.

O esquemático dos mecanismos utilizados para o manejo da irrigação está representado na Figura 5.

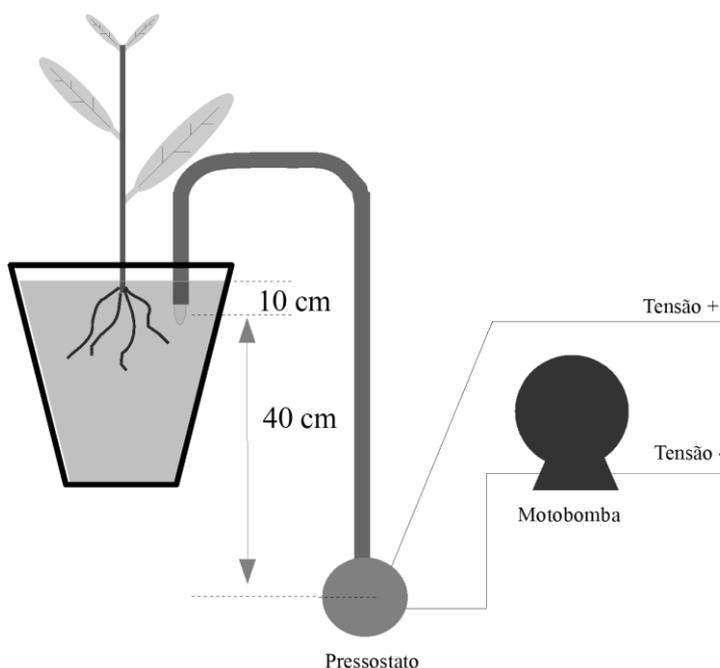


Figura 5. Esquema de funcionamento do acionador simplificado de irrigação utilizado no presente trabalho, adaptado de Medici et al. (2010).

O princípio de funcionamento do ASI é baseado na tensão de retenção de água no substrato (Medici et al., 2010), e pode ser explicado da seguinte maneira, tomando-se como exemplo o dispositivo utilizado no presente trabalho: 1) com a elevação da tensão de retenção da água no solo ou substrato, ocasionada pela redução da umidade na região de influência da vela de cerâmica, ocorre a saída de água do interior da mangueira, em direção ao substrato. Com isso, a pressão exercida pela coluna de água sobre o pressostato vai sendo aliviada, até um ponto (próximo de 4 kPa no substrato) em que o pressostato ou sensor de nível, altere automaticamente o estado da chave mecânica interna de aberto para fechado, permitindo a passagem de energia pelos seus terminais, acionando a motobomba, responsável pela pressurização do sistema de irrigação (Figura 5); e 2) iniciada a irrigação, a umidade do

substrato eleva-se novamente, fazendo com que certo volume de água flua do solo ou substrato, por meio da vela cerâmica, em direção à mangueira, o que permite a elevação da pressão interna na mangueira, reestabelecendo novamente a coluna de 40 cm de água incidente sobre o pressostato, até que a chave mecânica presente no pressostato retorne para a posição aberto (tensão próxima a 0 kPa no substrato), desligando automaticamente a moto bomba, cessando a irrigação.

Com o sistema de irrigação operando desta forma, fazendo-se uso de emissores com diferentes vazões, foi possível o estabelecimento de cinco regimes de irrigação (RI), os quais consistiram na aplicação de 36% (RI 36), 54% (RI 54), 85% (RI 85), 100% (RI 100) e 126% (RI 126) da LIR, sempre de forma simultânea para todos os tratamentos, conforme as necessidades hídricas das plantas de referência.

Antes do início dos tratamentos de irrigação, durante a fase de pré-enraizamento, que perdurou entre 04/01/2018 e 05/03/2018, a irrigação foi realizada por meio de um sistema de nebulização existente na casa de vegetação, o qual aplicava água diretamente nos canteiros de enraizamento. Durante esta fase, foram aplicados 34,5 mm de água.

A casa de vegetação utilizada (Van der Hoeven Estufas Agrícolas e Galvanização a Fogo, Artur Nogueira, São Paulo, Brasil) possuía sistema de semicontrolado automático de temperatura interna, o qual foi ajustado para o resfriamento do ambiente, mediante corrente forçada de ar úmido, toda vez que a temperatura atingisse 30 °C, baixando-a para 28 °C. A estrutura era totalmente fechada nas laterais e no teto com lona plástica translúcida de 150 micras, sendo o piso construído em concreto.

Para fins de monitoramento do clima no interior da casa de vegetação, foi instalada uma estação meteorológica modelo WatchDog 2000 Series (Spectrum Technologies, Illinois/EUA) próximo às bancadas onde o experimento foi conduzido. Os valores diários médios de temperatura (máxima, média e mínima), umidade relativa do ar, e diários acumulados de radiação solar e radiação fotossinteticamente ativa, registrados no interior da casa de vegetação, durante o período experimental estão, apresentados na Figura 6.

As variáveis biométricas comprimento da haste principal (H) e índice de área foliar (IAF) foram avaliadas aos 38, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias após o transplante (DAT). A variável H foi determinada de forma direta, medindo-se a distância entre a superfície do substrato e o ponto mais alto do ramo mais comprido da planta. A avaliação de IAF foi feita a partir da razão entre área foliar (AF) e a área ocupada por cada planta (0,0147 m²).

A variável AF foi estimada até os 105 DAT, com base na relação AF com maior largura do limbo foliar (MLLF) e comprimento da nervura central (CNC) em plantas de pimenta do reino (PARTELLI; VIEIRA e VIANA, 2007). Para isso, até os 105 DAT foram obtidos MLLF e CNC, com auxílio de uma régua, cujos valores foram utilizados em um modelo matemático, conforme descrito mais adiante.

Já aos 120 DAT, de forma destrutiva, a AF foi obtida por meio de um integrador de área foliar, modelo LAI 3010 (Licor Inc., Lincoln, NE, USA), após as mesmas terem sido destacadas das respectivas plantas.

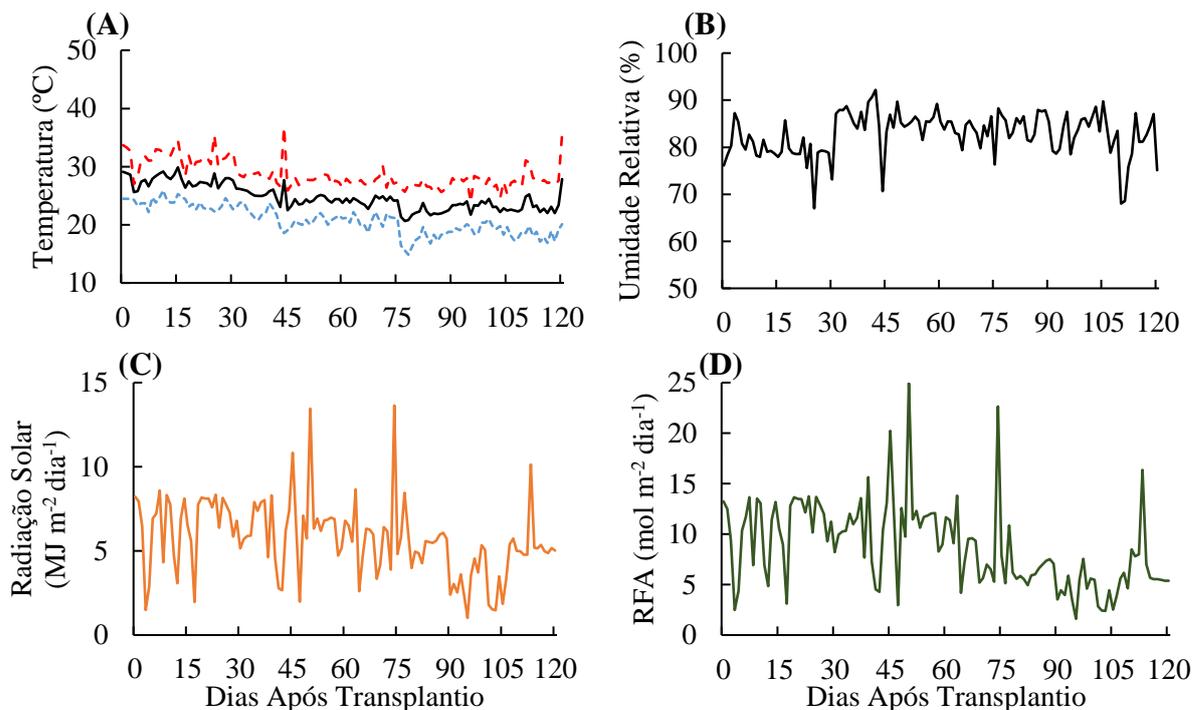


Figura 6. Valores médios diários de: A - Temperatura máxima (---), média (—) e mínima (---); e B - Umidade relativa do ar (—). Valores diários acumulados de: C - radiação solar (—); e D - Radiação fotossinteticamente ativa [RFA (—)], registrados no interior da casa de vegetação durante o período experimental.

Para fins de realização de análise de regressão, visando a obtenção de um modelo para a estimativa de AF, a partir de MLLF e CNC, durante o processo de medição direta de AF aos 120 DAT, foram selecionadas 82 folhas, com dimensões mais variadas possível, das quais obteve-se AF, MLLF e CNC. De posse desses dados, foi realizada análise de regressão, através da qual foi obtida a Equação 11, cujo coeficiente de determinação do ajuste foi de 0,9925, sendo significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. Na Figura 7 está apresentado graficamente o resultado da aplicação da Equação 11.

$$AF = - 0,5418 + 0,7104 \times MLLF \times CNC \quad (11)$$

em que:

AF – Área foliar (cm²);

MLLF – maior largura do limbo foliar (cm); e

CNC – comprimento da nervura central (cm).

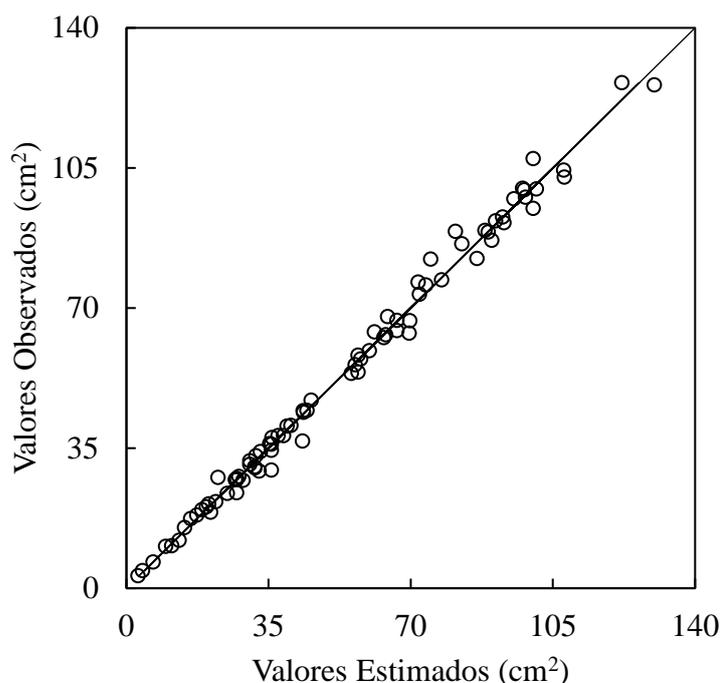


Figura 7. Valores observados e estimados de área foliar de plantas de pimento do reino, cv. Bragantina.

Aos 120 DAT avaliou-se os índices de clorofila *a* (CLa) e clorofila *b* (CLb). Para isso, foi utilizado um clorofilômetro eletrônico, modelo clorofiLOG – CFL1030 (Falker Automação Agrícola – Porto Alegre, RS - Brasil). Foi amostrada uma folha por planta, de três plantas por tratamento, sendo selecionadas as folhas mais novas, completamente expandidas. As plantas amostradas foram definidas por sorteio antes do início do experimento. Foram realizadas três medições por folha, sendo considerada a média destas medições.

Na mesma data, logo após a avaliação de H, da contagem do número de folhas (NF) e da determinação de CLa e CLb, todas as plantas foram colhidas, mediante corte rente ao substrato. As mesmas foram então divididas em parte aérea (caule + folhas) e raiz.

Foi realizada a lavagem das raízes, com auxílio de uma peneira de 1 mm, visando evitar a perda de material durante o processo. Logo em seguida as raízes foram removidas da estaca, acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados, e levadas para a secagem em estufa de circulação forçada a 60 °C, por 72 h, ou até massa constante. Ao final desse processo, o material foi cuidadosamente retirado dos sacos e pesado em uma balança analítica, sendo possível obter a massa seca de raiz por planta (MSR).

Já a determinação de massa seca de parte aérea (MSPA) se deu pelo acondicionamento de caule e folhas em sacos de papel devidamente identificados, realizando a redução do tamanho do material, quando necessário. Logo após os sacos foram colocados em uma estufa de circulação forçada a 60 °C, por 72 h, ou até massa constante. Ao fim do processo de secagem o material foi retirado dos sacos, pesados em uma balança analítica, determinando-se MSPA.

A eficiência do uso da água (EUA) foi calculada a partir da razão entre produção de massa de matéria seca total, neste caso o somatório de MSPA e MSR, expresso em quilograma, e o volume total de água consumido de acordo com cada regime de irrigação, expresso em metro cúbico.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 5 (três substratos e cinco regimes de irrigação), com 10 repetições, exceto para medidas de clorofila, para as quais foram consideradas três repetições. Visando testar os pressupostos da análise de variância, a normalidade e homogeneidade dos resíduos foram verificadas por meio

dos testes de Shapiro-Wilk (SHAPIRO e WILK, 1965) e Bartlett (BARTLETT, 1937), respectivamente, a 5% de probabilidade. Considerando tais critérios, as variáveis NF, AF, MSR e EUA necessitaram ser transformadas em \sqrt{x} , de tal forma que em todos os casos houve redução do coeficiente de variação, em comparação com os dados não transformados.

Atendidos os pressupostos, procedeu-se análise de variância pelo teste F, com nível de significância de 5%. Rejeitando-se a hipótese nula, foram executadas análises de regressão para o fator regime de irrigação e testes de média de Skott-Knott a 5% de probabilidade para substrato.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de avaliações ocorreram 27 acionamentos automáticos do sistema de irrigação, tendo sido aplicados 0,282 (RI 36); 0,424 (RI 55); 0,666 (RI 85); 0,787 (RI 100); e 0,988 L planta⁻¹ (RI 126) (Figura 8, Tabela 9).

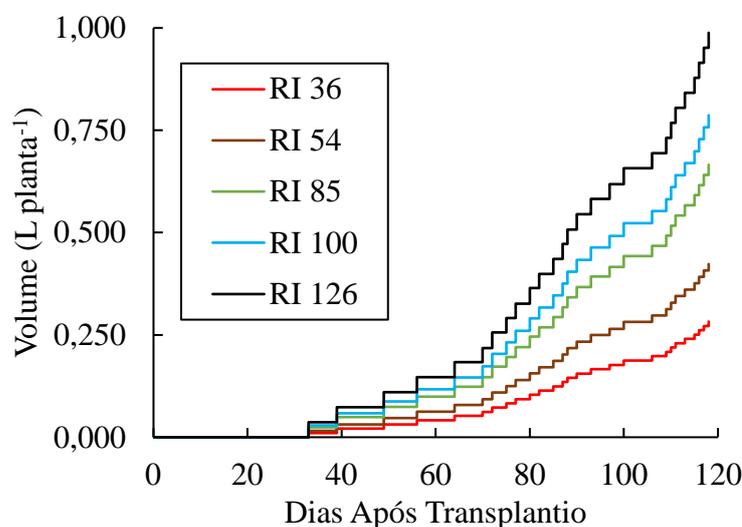


Figura 8. Volume de água acumulado, aplicado em plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, conforme regimes de irrigação equivalentes a 36% (RI 36), 54% (RI 54), 85% (RI 85), 100% (RI 100) e 126% (RI 126) da lâmina de irrigação de referência.

Tabela 9. Número de irrigações e volumes mensais acumulados de água aplicados em mudas de pimenta do reino, cultivadas em ambiente protegido, em função de diferentes regimes de irrigação (RI).

Mês	Nº de Irrigações	RI 36	RI 54	RI 85	RI 100	RI 126
		Volume Acumulado (L planta ⁻¹)				
Março*	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Abril	4	0,042	0,063	0,099	0,117	0,147
Mai	9	0,010	0,139	0,219	0,259	0,325
Junho	13	0,137	0,205	0,323	0,381	0,479
Julho**	1	0,011	0,016	0,025	0,029	0,037
Total	27	0,282	0,424	0,666	0,787	0,988

*Contabilizado a partir de 06/03/2018; e **Contabilizado até 03/07/2018.

O primeiro evento de irrigação ocorreu aos 33 DAT, período em que foi aplicado cerca de 3,7% da água total, em razão dos RIs, tendo passado praticamente todo o mês de março sem que houvesse irrigação. A partir desta data, e até os 70 DAT, ocorreram cinco eventos de irrigação, com turno de rega médio de 7,4 dias. Neste período, o volume acumulado de água aplicado correspondeu a 18,3% do total aplicado em todo o experimento (Figura 8). Após este período, até o final do experimento, o turno de rega médio foi reduzido para 2,3 dias, quando ocorreram 21 eventos de irrigação. Neste ínterim, o volume de água aplicado correspondeu a 78% do total aplicado durante todo o experimento (Figura 8, Tabela 9).

Os valores de H registrados ao longo do experimento estão representados graficamente na Figura 9. Na Figura 10 estão representados os valores de IAF, registrados durante o período de avaliação.

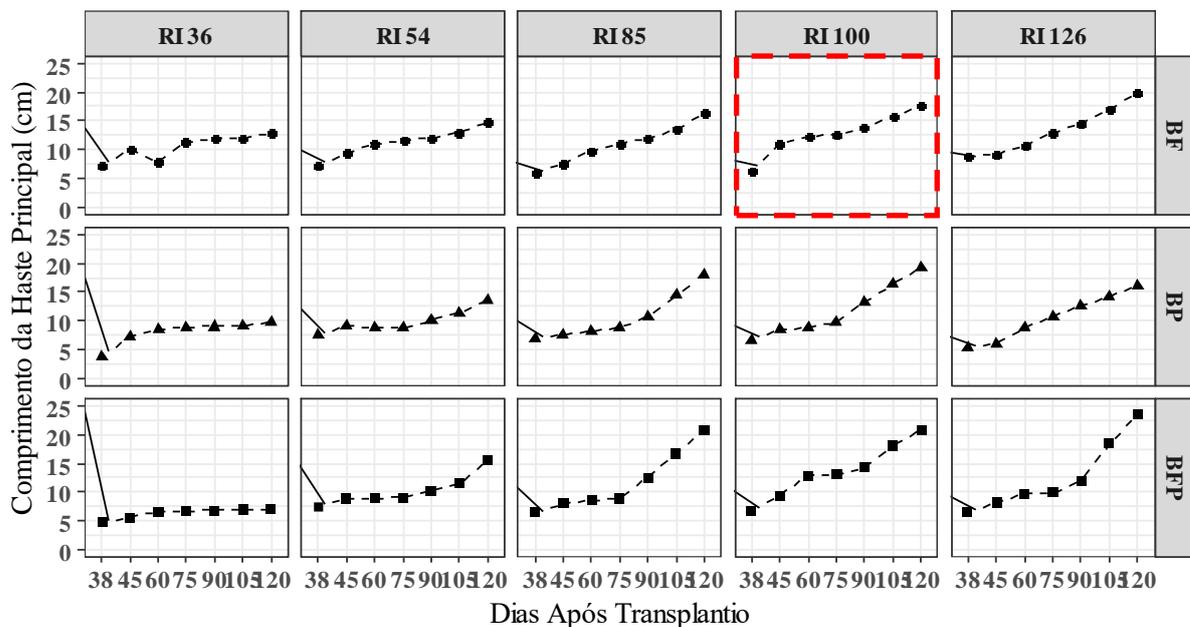


Figura 9. Comprimento da haste principal de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 38, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias após o transplante, em função de diferentes regimes de irrigação (colunas) e substratos isentos (linhas). Em destaque está o tratamento de referência para fins de irrigação; RI 36 – 36% da lâmina de irrigação de referência (LIR); RI 54 – 54% LIR; RI 85 – 85% LIR, RI 100 – 100% LIR; RI 126 – 126% LIR; BF – 75% de bio sólido (BIO) + 25% fibra de coco triturada (FC); BP – 75% BIO + 25% pó de rocha granítica (PR); e BFP – 50% B + 25% FC + 25% PR.

De uma forma geral, em termos de crescimento, avaliado por meio de H, o efeito dos tratamentos de irrigação foi mais evidente a partir dos 75 DAT para a maior parte dos tratamentos, com exceção das plantas submetidas a RI 36, as quais praticamente cessaram o aumento de H a partir desta data (Figura 9). As plantas submetidas aos tratamentos BFP foram as que apresentaram respostas mais pronunciadas em função dos RIs, com menor taxa de aumento de H sob RI 36 e maior sob RI 126 (Figura 9).

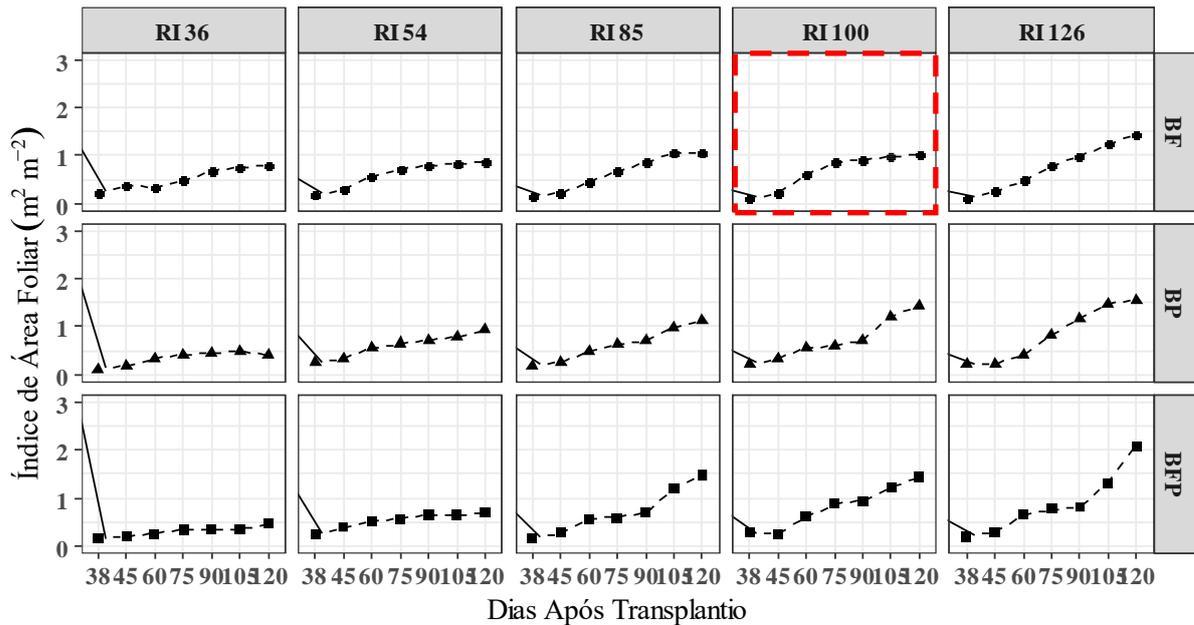


Figura 10. Índice de área foliar de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 38, 45, 60, 75, 90, 105 e 120 dias após o transplante, em função de diferentes regimes de irrigação (colunas) e substratos isentos (linhas). Em destaque está o tratamento de referência para fins de irrigação; RI 36 – 36% da lâmina de irrigação de referência (LIR); RI 54 – 54% LIR; RI 85 – 85% LIR, RI 100 – 100% LIR; RI 126 – 126% LIR; BF – 75% de bio sólido (BIO) + 25% fibra de coco triturada (FC); BP – 75% BIO + 25% pó de rocha granítica (PR); e BFP – 50% BIO + 25% FC + 25% PR.

A variação dos valores de IAF em função dos tratamentos referentes aos RIs ficou evidente a partir dos 60 DAT para a maior parte dos tratamentos (Figura 10), de uma forma geral um pouco mais cedo que a evolução de H (Figura 9). Isso pode ser devido ao fato de as plantas utilizarem como estratégia de priorizar a expansão foliar, com a finalidade de aumentar a área de captação de luz, para a produção de foto assimilados, por meio da fotossíntese, o que permite a multiplicação celular para o crescimento em si.

Ocorreram ciclos de crescimento com diferentes velocidades ao longo do experimento, principalmente para BFP, sob RI superior a 85 (Figura 9 e Figura 10). Existe uma estreita relação entre déficit hídrico e retardamento de crescimento, o que tende a controlar a demanda hídrica das plantas (TAIZ et al., 2017). Esse efeito pode ter feito com que houvesse relativa baixa oferta hídrica generalizada em alguns momentos, condicionada por plantas cultivadas em BF sob RI 100, fazendo com que estas plantas, de forma indireta, promovessem a redução de crescimento e de demanda hídrica de plantas cultivadas nos outros dois substratos, proporcionando ciclos de aceleração de crescimento ao longo do experimento, conforme observado nas Figura 9 e Figura 10.

Os RIs influenciaram isoladamente as variáveis biométricas H, MSPA e EUA. Já os tipos de substratos, também isoladamente, influenciaram H e MSR. A interação entre esses dois fatores, no entanto, influenciou de forma significativa ($p = 0,05$) as variáveis IAF, NF, CLa e CLb.

O aumento nos RIs proporcionou aumento de forma linear em H e MSPA, de tal forma que, cerca de 88% da variabilidade de H e 93% de MSPA, podem ser explicadas pela variabilidade de RI (Figura 11).

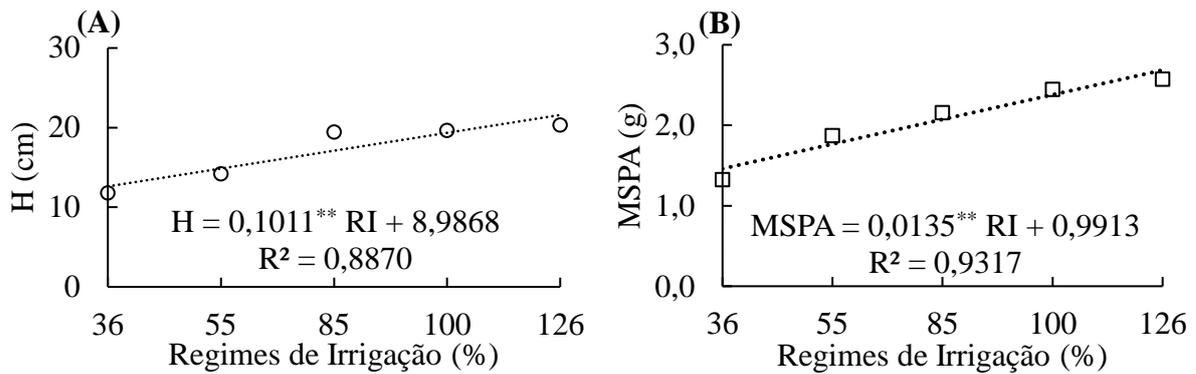


Figura 11. Análise de regressão de comprimento da haste principal (H) e massa seca de parte aérea (MSPA) de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, em função de regimes de irrigação (RI). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

A razão mantida entre H e os RIs foi de aproximadamente 1:10, ou seja, o incremento de 10% em RI representou o aumento unitário em H (Figura 11A). Altura de plantas é uma das variáveis consideradas para a avaliação da qualidade de mudas de pimenta do reino entre os produtores rurais, visando o plantio em campo, sendo que valores de H entre 20 e 30 cm são consideradas adequadas para esse fim (SERRANO et al., 2012). No presente trabalho, ficou evidente que, em valores absolutos, plantas submetidas a RIs iguais ou superiores a 85% da LIR (RI 85, RI 100 e RI 126) apresentaram H mais próximo desse padrão, com poucas diferenças entre si (Figura 11A). No entanto, essa afirmação é verdadeira somente para médias desconsiderando o fator substrato, haja vista que a interação deste com RI não foi significativa, conforme já mencionado. Os valores de H obtidos no presente trabalho são inferiores aos obtidos por Serrano et al. (2012) para as cultivares Guajarina (30,7 cm), Iaçará (28,0 cm) e Cingapura (27,0 cm), cultivadas em substrato comercial, adubado com fertilizante NPK.

Respostas semelhantes (redução de H pela redução de RI) já foram reportadas para pimentão (*Capsicum annum*) (PEREIRA et al., 2019), rúcula (*Eruca sativa*) (FREITAS et al., 2017), alface (*Lactuca sativa*) (BEZERRA et al., 2019) e girassol de corte (*Helianthus annuus*) (OLIVEIRA et al., 2018), entre outros, porém, para a cultura da pimenta do reino, sobretudo na fase de produção de mudas são escassas essas informações.

Este fenômeno é ocasionado pela redução de condutância estomática em plantas submetidas a déficits hídricos (SEZEN; YAZAR e TEKIN, 2019; VALENÇA et al., 2018), em maior ou menor escala, fazendo com que o processo respiratório seja afetado negativamente, interferindo no acúmulo de matéria seca pelas plantas (TAIZ et al., 2017).

Os valores médios de MSPA, em função dos RIs, variaram de 1,3 g planta⁻¹ a 2,6 g planta⁻¹, sendo que o aumento dos RIs proporcionou aumento linear de MSPA, a uma taxa de aproximadamente um grama de MSPA para cada 74% nos RIs (Figura 11B). Em termos absolutos, os valores médios de MSPA variaram de 1,4 g planta⁻¹ (RI 36) a 2,2 g planta⁻¹ (RI 100) para o substrato BF; 1,3 g planta⁻¹ (RI 36) a 2,7 g planta⁻¹ (RI 100) para BFP; e 1,3 g planta⁻¹ (RI 36) a 3,0 g planta⁻¹ (RI 126) para BP. Em comparação com os valores de MSPA obtidos por Serrano et al., 2012 (5,14 g, cv. Guajarina; 3,17 g, cv. Iaçará; e 2,26 g, cv. Cingapura), para plantas cultivadas em substrato comercial, adubados com NPK 15-09-12 nas dosagens de 0; 2,5; 5,0; 7,5; e 10,0 kg m⁻³ de substrato, os resultados obtidos no presente trabalho são inferiores (BF) e semelhantes a cv. Guajarina (BP / RI 126) e cv. Iaçará (BFP / RI 100).

As variáveis H e MSR foram influenciadas significativamente ($p < 0,05$) pelo tipo de substrato, independentemente de RI. Os valores médios de H observados foram 18,9 cm (BFP), 16,4 cm (BF) e 16,0 cm (BP). Estatisticamente não houve diferença ($p > 0,05$) entre os dois menores valores, os quais foram inferiores ao observado para BFP (Tabela 10). Nota-se que

nenhum desses valores médios superaram ou igualaram a marca dos 20 cm, considerada a altura mínima para plantas de padrão apta para os plantios em campo, conforme já citado. Isso é devido ao fato de esta ser uma média geral de todos os RIs. Quando analisamos os valores médios de H por substrato e por RI, verificamos que apenas plantas cultivadas com substrato BFP e submetidas a RIs iguais ou superiores a 85% da LIR apresentaram H igual a 21,7 cm (RI 85), 22,0 cm (RI 100) e 25,1 cm (RI 126).

Tabela 10. Valores médios e desvio padrão de comprimento da haste principal e massa seca de sistema radicular de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, submetidas a diferentes substratos.

Variável	BF	BFP	BP
H (cm)	16,4* b ± 4,7	18,9 a ± 7,3	16,0 b ± 6,1
MSR (mg)	231 b ± 133	446 a ± 216	574 a ± 384

*Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; H – comprimento da haste principal; MSR – massa seca de sistema radicular; BF - biossólido (BIO) + fibra de coco triturada (FC) (3:1, em volume); BP - BIO + pó de rocha granítica (PR) (3:1, em vol.); e BFP - BIO + FC + PR (2:1:1, em vol.).

De forma geral, os valores de MSR foram relativamente baixos, e variaram de 231 mg planta⁻¹ (BF) a 574 mg planta⁻¹ (BFP) (Tabela 10). Os valores de MSR obtidos no presente trabalho são semelhantes aos obtidos por Freire et al. (2017), que, ao avaliarem plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 105 DAP e submetidas a diferentes tipos de substrato, observaram MSR entre 168 a 505 mg, os quais foram referentes ao uso de substratos compostos por: 1) solo de horizonte C + palha de café + superfosfato simples + esterco bovino; e 2) solo de horizonte C + calcário + superfosfato simples + cloreto de potássio + esterco de galinha, respectivamente. São, porém, inferiores aos obtidos por Serrano et al. (2012) para cv. Guajarina (2.120 mg) e cv. Iaçará (1.420 mg), e similares (BFP) aos obtidos para a cv. Cingapura (560 mg).

De maneira geral, a cv. Bragantina apresenta baixa qualidade rizogênia, em comparação com outras cultivares comumente utilizadas no Brasil, o que inclusive justifica o uso de indutores de enraizamento para a melhoria desta característica, por parte dos produtores de mudas, e, em parte, explica os relativos baixos valores de MSR obtidos no presente trabalho (SECUNDINO et al., 2014).

No presente trabalho ficou evidente a inferioridade do substrato BF, no que se referiu aos valores de MSR (231 mg planta⁻¹). Esse valor correspondeu a 48% do valor de MSR observado para BFP (446 mg planta⁻¹) e 60% do valor observado para BP (574 g planta⁻¹) (Tabela 10). Esse fato pode ser explicado pela baixa qualidade química de BF, notadamente pH baixo, característica capaz de inibir diretamente o desenvolvimento e a função radicular de plantas de pimenta do reino (ZU et al., 2014).

A elevação dos RIs proporcionou aumento do IAF e de NF, no entanto, para ambas as variáveis a resposta foi diferente em função dos tipos de substrato (Figura 12). A maior variação de IAF ocorreu em plantas submetidas ao substrato BFP, seguido de BP e BF.

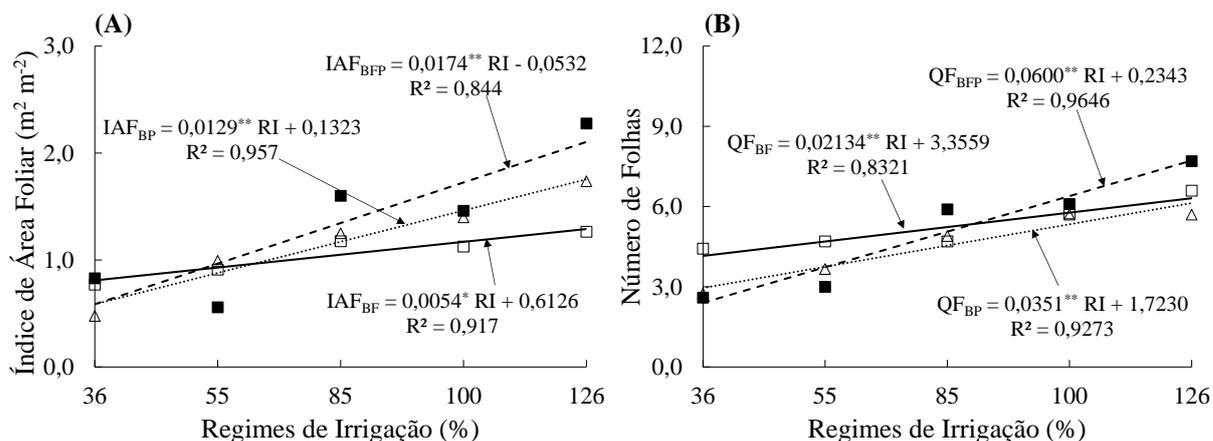


Figura 12. Análise de regressão de índice de área foliar (A) e número de folhas (B) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT submetidas a diferentes substratos e regimes de irrigação. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; e **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; IAF - índice de área foliar; NF - número de folhas; RI - regime de irrigação; (□) BF - bio-sólido (BIO) + fibra de coco triturada (FC) (3:1, em volume); (Δ) BP - BIO + pó de rocha granítica (PR) (3:1, em vol.); e (■) BFP - BIO + FC + PR (2:1:1, em vol.).

O aumento dos RIs em 10% correspondeu a elevações de IAF na ordem de 0,174 m² m⁻² (BFP), 0,129 m² m⁻² (BP) e 0,054 m² m⁻² (BF) (Figura 12A). Da mesma forma, ao se elevar em 10% os RIs, notou-se elevação de NF em cerca de 0,6 (BFP), 0,4 (BP) e 0,2 (BF) (Figura 12B). Para ambas as variáveis fica nítida a seguinte seqüência de qualidade dos substratos: BFP > BP > BF.

Plantas cultivadas com o uso do substrato BFP apresentaram maior IAF sob RI 36 (0,83 m² m⁻²) e RI 126 (2,28 m² m⁻²), e menores valores de IAF e NF sob RI 55 (0,56 m² m⁻² e 3,0, respectivamente). Plantas sob BF apresentaram menor valor de IAF sob RI 126 (1,27 m² m⁻²) e maiores NFs sob RI 36 (4,4) e RI 55 (4,7). O uso do substrato BP proporcionou plantas com menor IAF sob RI 36 (0,48 m² m⁻²). Não houve diferenças significativas entre os valores de IAF e NF registrados para plantas submetidas a RI 85 e RI 100 (Tabela 11).

Tabela 11. Valores médios e desvio padrão de características biométricas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, sob diferentes substratos e regimes de irrigação.

Variável	Subst	Regimes de Irrigação (% LIR)				
		36	55	85	100	126
IAF (m ² m ⁻²)	BFP	0,83* a ± 0,34	0,56 b ± 0,21	1,60 a ± 0,77	1,46 a ± 0,49	2,28 a ± 0,69
	BF	0,77 ab ± 0,40	0,91 a ± 0,24	1,18 a ± 0,71	1,13 a ± 0,35	1,27 b ± 0,69
	BP	0,48 b ± 0,13	0,99 a ± 0,36	1,25 a ± 0,61	1,40 a ± 0,93	1,74 ab ± 0,84
NF	BFP	2,6 b ± 0,7	3,0 b ± 1,2	5,9 a ± 2,3	6,1 a ± 2,0	7,7 a ± 2,3
	BF	4,4 a ± 1,4	4,7 a ± 1,6	4,7 a ± 1,4	5,8 a ± 1,5	6,6 a ± 3,2
	BP	2,8 b ± 0,8	3,7 ab ± 1,6	4,9 a ± 2,2	5,7 a ± 2,3	5,7 a ± 2,4

Subst – Substrato; * médias seguidas pela mesma letra nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade; IAF - índice de área foliar; NF - número de folhas; LIR – lâmina de irrigação de referência; BF - bio-sólido (BIO) + fibra de coco triturada (FC) (3:1, em volume); BP - BIO + pó de rocha granítica (PR) (3:1, em vol.); e BFP - BIO + FC + PR (2:1:1, em vol.).

De maneira geral, nota-se que os melhores resultados para o substrato BFP ocorreram sob RIs iguais ou superiores a 85% de LIR, tanto para IAF, quanto para NF. Por outro lado, o substrato BF proporcionou valores de IAF e NF relativamente altos em RIs inferiores a esses

(Tabela 11). No entanto, os resultados de NF são inferiores aos obtidos por Serrano et al. (2012), os quais obtiveram plantas com NF médio de 11,1 (cv. Guajarina), 11,0 (cv. Iaçará) e 12,9 (cv. Cingapura). Tal diferença pode ser explicada pelo fato de que os autores empregaram substratos comerciais adubados com diferentes doses de NPK 15-09-12, o que significou importante aporte de nutrientes, principalmente N e P, fazendo com que houvesse maior desenvolvimento vegetativo, em comparação com as plantas produzidas no presente trabalho, no qual foram utilizados substratos alternativos, não corrigidos. Além disso, os autores testaram cultivares distintas da testada no presente trabalho, o que pode ser fonte de divergências.

Os resultados obtidos no presente trabalho evidenciam que, pelo fato de o tratamento de substrato padrão para fins de definição da irrigação ter sido BF, pode ser que o potencial dos demais substratos testados tenha sido limitado, haja vista que a oferta hídrica nestes, era dependente da demanda hídrica de plantas submetidas a BF.

Na Figura 13 estão apresentados os resultados das análises de regressão dos teores de clorofila a e clorofila b, em função dos RIs e substratos testados, enquanto na Tabela 12 estão apresentados os valores médios e os respectivos testes para as mesmas variáveis.

Foram observadas diferenças nos valores de CLa e CLb conforme os substratos. Não houve ajuste de função que descrevesse adequadamente a variação de CLa e CLa em função da variação de RI para os substratos BFP e BF. Já para o substrato BP, existiu relações significativas e quadráticas entre os índices de clorofila (CLa e CLb) e RI. A correlação entre os índices de clorofila e RI resultaram em R^2 de 0,909 (CLa) e 0,934 (CLb) (Figura 13).

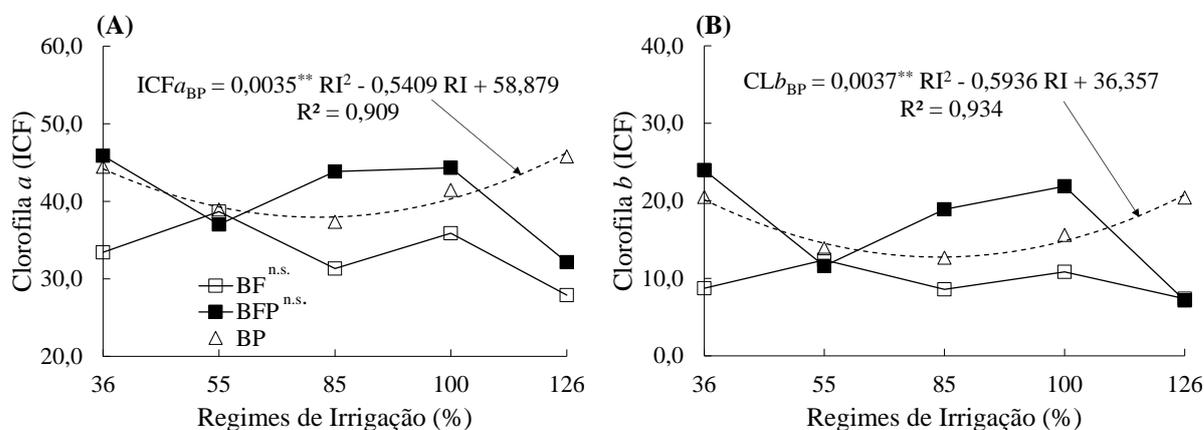


Figura 13. Análise de regressão de índice de clorofila a (A) e clorofila b (B) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, sob diferentes substratos e regimes de irrigação (RI). *Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; ^{n.s.} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; CLa – clorofila a; CLb – clorofila b; ICF – índice de clorofila Falker; BF – biofóssido (BIO) + fibra de coco triturada (FC) (3:1, em volume); BP – BIO + pó de rocha granítica (PR) (3:1, em vol.); BFP – BIO + FC + PR (2:1:1, em vol.).

Conforme o modelo ajustado, para o substrato BP, o menor índice de CLa obtido equivaleria a 38,0 ICF, sob um RI de 77% da LIR. Já para CLb, esses valores mínimos seriam 12,5 ICF e RI 80% de LIR (Figura 13). Os maiores valores para ambas as variáveis ocorreram sob RI 36 e RI 126, indicando que no primeiro caso pode ter ocorrido um efeito de concentração de pigmentos fotossintéticos, em função da redução de área foliar, enquanto no segundo caso, pode ter ocorrido maior concentração nas folhas, em função da necessidade de conversão de energia pelas plantas, dado o relativo maior crescimento, observado em plantas submetidas ao maior RI.

Os valores de CLa variaram de 27,9 a 38,7 ICF para o substrato BF, sendo o menor valor observado em plantas submetidas ao maior RI. De maneira geral houve tendência discreta

de queda com o aumento de RI, com oscilações positivas de CLa de RI 36 para RI 55 e de RI 85 para RI 100 (Figura 13A). A mesma tendência ocorreu para CLb, porém em menor magnitude, tendo ocorrido variação de 7,4 a 12,4 ICF (Figura 13B).

Para plantas cultivadas no substrato BFP foi observada variação de CLa entre 32,2 e 45,9 ICF, sendo tais valores referentes a RI 126 e RI 36, respectivamente. Ocorreram quedas nos valores de CLa de RI 36 para RI 55 e de RI 100 para RI 126. Para RI 85 e RI 100 os valores de CLa foram 43,4 e 44,3 ICF, respectivamente (Figura 13A). A variação de CLb foi de 7,2 a 24,0 ICF para o mesmo substrato, sendo tais valores referentes a RI 126 e RI 36, respectivamente. De RI 36 para RI 55 ocorreu queda de CLb, e a partir deste RI, foi observado aumentos de CLb até RI 100, ponto a partir do qual, ocorreu nova queda, até se atingir o menor valor registrado (Figura 13B).

Tabela 12. Valores médios e desvio padrão de índices de clorofila a (CLa) e b (CLb) de mudas de pimenteira do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, em diferentes regimes de irrigação e substratos.

Variável	Subst	Regimes de Irrigação (% LIR)				
		36	55	85	100	126
CL _a (ICF)	BFP	45,9 a	37,0 a	43,9 a	44,3 a	32,2 b
	BP	44,5 ab	39,0 a	37,4 ab	41,5 a	45,8 a
	BF	33,4 b	38,7 a	31,3 b	35,9 a	27,9 b
CL _b (ICF)	BFP	24,0 a	11,6 a	18,9 a	21,9 a	7,2 b
	BP	20,5 a	13,9 a	12,7 ab	15,6 ab	20,4 a
	BF	8,7 b	12,4 a	8,6 b	10,8 b	7,4 b

Subst – Substrato; CL_a – índice de clorofila *a*; CL_b – índice de clorofila *b*; BF – 75% bio sólido (BIO) + 25% fibra de coco triturada (FC) (% vol.); BP – 75% BIO + 25% pó de rocha granítica (PR) (% vol.); BFP – 50% BIO + 25% FC + 25% PR (% vol.); *Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Os resultados evidenciam que para os substratos BF e BFP ocorreu tendência de concentração de pigmentos fotossintéticos em folhas de plantas submetidas ao menor RI (RI 36), tendo ocorrido o inverso em plantas submetidas a RI 126 (Figura 13A-B). Isso pode ser explicado pelo fato de que o grupo de plantas submetidas a RI 36 apresentou menores valores de IAF e NF, em comparação com plantas submetidas a RI 126 (Figura 12 e Tabela 11), fazendo com que os pigmentos fotossintéticos permanecessem concentrados na primeira condição, elevando os valores de CLa e CLb (Figura 13 e Tabela 12).

Na Figura 14 está apresentada a análise de regressão de EUA em função dos RIs estudados.

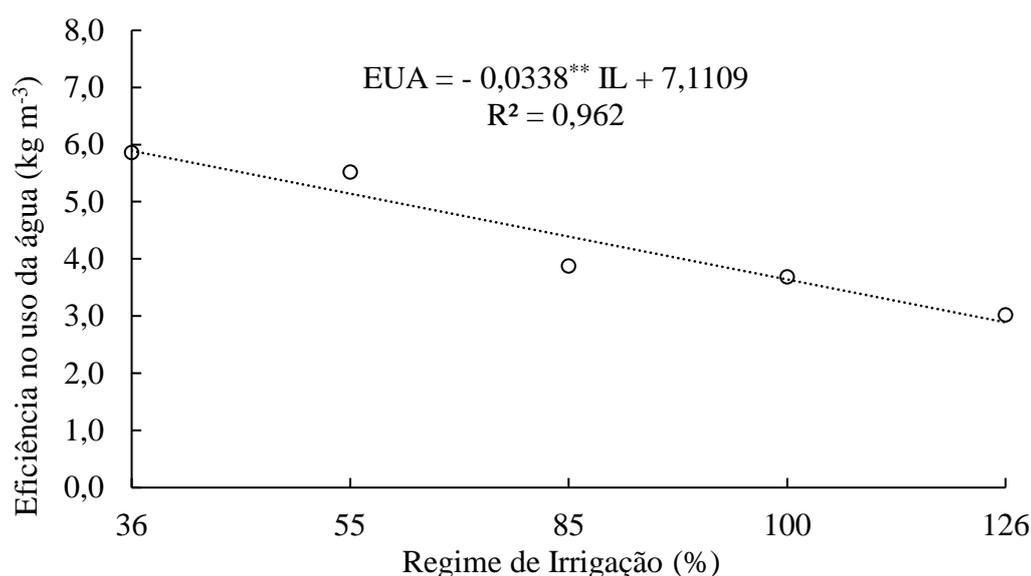


Figura 14. Análise de regressão de eficiência no uso da água (EUA) de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 120 DAT, em função dos regimes de irrigação (RI). **Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t

Ocorreu uma relação significativa, linear e negativa entre EUA e RI, na qual cerca de 96% da variabilidade de EUA pôde ser explicada pela variabilidade de RI. Os valores de EUA variaram de 3,02 a 5,86 kg m⁻³, sendo esses referentes a RI 126 e RI 36, respectivamente. De acordo com o modelo de regressão ajustado, a redução de RI em 10%, equivaleu a um acréscimo de aproximadamente 0,3 no valor de EUA (Figura 14).

Em valores absolutos, foi possível notar maior redução de EUA de RI 55 para RI 85 (1,64 kg m⁻³), em comparação com os demais intervalos. Em contrapartida, a partir de RI 85 ocorreu evidente desaceleração na redução de EUA, sendo tais valores da ordem de 0,19 kg m⁻³ (RI 85 para RI 100) e 0,67 kg m⁻³ (RI 100 para RI 126) (Figura 14). Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Freitas et al. (2017), que, estudando déficits de 25%, 50%, 75% e 100% da evapotranspiração da cultura (ET) em plantas de rúcula (*Eruca sativa* L.), verificaram maior redução absoluta de EUA de 75% ET para 100% ET, sobretudo quando as plantas foram adubadas com 400 kg ha⁻¹ de K₂O.

A análise do RI mais adequado sob o ponto de vista de EUA deve levar em consideração a máxima redução de água aplicada, sem comprometimento significativo da produtividade. Neste sentido, Yang et al. (2017) verificaram que a produtividade e EUA máximas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) em cultivo protegido foram obtidas em 89,5% e 77,0% da ET máxima, respectivamente. Além disso, verificaram que plantas de melancia (*Citrullus vulgaris*), cultivadas na temporada inverno-primavera, apresentaram maior EUA quando foi aplicado cerca de 24,1% a menos de água, em comparação com o tratamento de maior produtividade (69,3 Mg ha⁻¹ / 210,9 mm), porém com perda de produtividade de apenas 4,8%. Estes autores ainda observaram maior EUA em cultivos de pimentão, na safra de maior produção avaliada, no tratamento que apresentou produtividade cerca de 19,6% inferior a maior auferida, porém, com redução de consumo de água da ordem de 30,9%. Valença et al. (2018) verificaram que a máxima EUA de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.), cultivadas em sistema vasopônico orgânico de produção foi referente a 83% da lâmina de irrigação de referência.

Comparando-se algumas das principais características de plantas submetidas a RI 85 e RI 126 apenas, independentemente do tipo de substrato, foram observados aumentos de H, MSPA, IAF e NF em torno de 4,2%, 16,1%, 21,6% e 22,1% respectivamente. Por outro lado, o volume de água aplicado em RI 126, foi 0,322 L planta⁻¹ superior ao aplicado em RI 85, o

que equivaleu a um aumento de 32,6% no gasto de água. Desta forma, considerando as relativas baixas perdas de qualidade das mudas e a economia de 32,6% de água, pode-se considerar o RI 85 como mais adequado para a produção de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina.

De maneira geral, os resultados demonstram que a baixa qualidade química do substrato BF limitou o crescimento de plantas de pimenta do reino. Tal limitação, por sua vez, influenciou negativamente a expressão do máximo potencial dos outros dois substratos testados, uma vez que a LIR era referente à demanda hídrica de plantas submetidas a BF e IR 100. Notadamente, a principal característica limitante de BF foi referente ao baixo valor de pH (3,9) e alta acidez potencial ($11,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), o que tem efeito inibitório de desenvolvimento e de funções radiculares em plantas de pimenta do reino, prejudicando a absorção de K, Ca e Mg, principalmente (ZU et al., 2014). No entanto, este substrato apresentou os maiores teores de N ($26,0 \text{ mg kg}^{-1}$), P ($36,1 \text{ mg dm}^{-3}$), K ($1,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Mg ($1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), indicando que técnicas simples para a elevação do pH até próximo de 5,5, valor considerado ideal (ZU et al., 2014), pode fazer com que este substrato apresente respostas superiores para a produção de mudas de pimenta do reino, do que as obtidas no presente trabalho.

Da mesma forma, houve certa restrição do crescimento de plantas para os demais substratos testados, em função do crescimento deficitário de plantas cultivadas com BF, e, por isso, pode-se supor que BFP e BP são capazes de produzir mudas de pimenta do reino de melhor qualidade que as produzidas no presente trabalho.

Dentre os RIs testados, pôde-se afirmar que não houve queda significativa na qualidade das mudas de pimenta do reino produzidas, quando foi empregado RI 85, em comparação com o maior RI testado. Procedendo desta forma, o volume de água economizado foi de $0,322 \text{ L planta}^{-1}$, o que pode ser significativo, se considerarmos, por exemplo, que na principal região produtora de pimenta do reino no Espírito Santo, segundo maior produtor nacional, ocorre um déficit hídrico de aproximadamente 277 mm ao ano. Soma-se a isso o fato de que dos 520 estabelecimentos credenciados para a produção de mudas de pimenta do reino no Brasil, 174 (33%) estão localizados neste estado (MAPA, 2020), demandando, portanto, grande volume de água para a produção deste insumo.

4.6 CONCLUSÕES

O substrato composto por biossólido e fibra de coco triturada (3:1, v/v), apresenta restrições químicas, principalmente baixo pH, as quais, podem comprometer seu uso para a produção de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina.

Sob as condições experimentais do presente trabalho, é possível a produção de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, com alturas iguais ou superiores a 20 cm e seis ou mais folhas, desde que seja usado um substrato composto por biossólido, fibra de coco tritura e pó de rocha granítica (2:1:1, v/v), em associação a regimes de irrigação superiores a 85% da lâmina de irrigação de referência.

Restrições de até 15% da necessidade hídrica de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, não representam impactos negativos sobre a eficiência de uso da água destas plantas.

5 CAPÍTULO III

EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E CRESCIMENTO DE PLANTAS DE PIMENTA DO REINO SOB ESTRESSES BIÓTICO E ABIÓTICO

5.1 RESUMO

Além de ser sensível a estresse hídrico, a cultura da pimenta do reino (*Piper nigrum* L.) pode ser acometida por diversos tipos de doenças. Um importante problema fitossanitário enfrentado pelos produtores de pimenta do reino nacionais é a Fusariose, doença causada pelo fungo de solo *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, para a qual não existe controle químico eficaz ou cultivar resistente. O uso de bioagentes para o controle de doenças de plantas vem crescendo nos últimos anos, tendo em vista o baixo impacto ambiental decorrente, bem como sua ampla capacidade de ação, no entanto, ainda existem poucas informações sobre seu efeito sobre a Fusariose. O intuito deste trabalho foi avaliar a eficiência fotossintética e o crescimento de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, submetidas a diferentes regimes de irrigação (RI), aplicação de produtos à base de *Trichoderma* spp. e inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*. Foram testados quatro RIs, referentes a 41% (RI 41), 59% (RI 59), 79% (RI 79) e 100% (RI 100) da lâmina de irrigação de referência (LIR). Foram utilizadas plantas com 150 dias de idade, cultivadas em vasos com capacidade de 800 cm³, preenchidos com substrato composto por 50% de biossólido, 25% de fibra de coco triturada e 25% de pó de rocha granítica (% vol.). Aos 60 dias anteriores ao transplantio os substratos foram tratados com produtos comerciais à base de *Trichoderma harzianum* (TH), *Trichoderma asperellum* (TA) ou *Trichoderma stromaticum* (TS), nas dosagens de $2,4 \times 10^4$, $1,79 \times 10^3$ e $4,56 \times 10^5$ UFC g⁻¹ substrato, respectivamente. As testemunhas consistiram no tratamento com fungicida sistêmico à base de Carbendazim (FG) e água destilada (TT). A inoculação com o fitopatógeno (FSP) foi feita mediante imersão das raízes em suspensão de esporos (10^5 UFC mL⁻¹), no momento do transplantio, enquanto o controle consistiu na imersão das raízes em água destilada. O período de observações foi de 180 dias, contados a partir do transplantio, data em que foi avaliado número de folhas (NF), área foliar (AF), massa fresca e seca de folhas (MFF e MSF, respectivamente) e caule (MFC e MSC, respectivamente), e massa seca de sistema radicular (MSR). Aos 160, 170 e 180 dias após o transplantio foram avaliados comprimento da haste principal (H), índice de clorofila *a* (CLa), clorofila *b* (CLb) e fluorescência da clorofila *a*. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 x 2 x 4 (*Trichoderma* spp., FSP e RI, respectivamente), com cinco repetições. Os resultados evidenciaram influência dos RIs sobre o crescimento de plantas de pimenta do reino, com aumento dos valores de todas as variáveis biométricas estudadas, em função do aumento de RI. A aplicação de *Trichoderma asperellum* no substrato proporcionou aumento de 14% no NF e de *Trichoderma harzianum* redução de 20%, em comparação com a testemunha. A aplicação de *Trichoderma stromaticum* incrementou em 28% o acúmulo de MSR, em comparação com a testemunha, e de *Trichoderma harzianum*, um decréscimo de 53%. Para as três épocas de amostragem, os maiores índices de performance fotossintética foram observados em plantas não inoculadas (TF) e submetidas a RI 41, enquanto os menores foram observados em plantas inoculadas (FSP), sob RI 100. O aumento nos regimes de irrigação proporciona elevação de comprimento da haste principal e acúmulo de matéria seca em plantas jovens de pimenta do reino, cv. Bragantina. O tratamento de substratos com produtos comerciais à base de *Trichoderma asperellum* e *Trichoderma stromaticum* favorece o crescimento de plantas jovens de pimenta do reino, cv. Bragantina, o que é negativamente afetado pelo tratamento com *Trichoderma harzianum*. A eficiência fotossintética de plantas jovens de pimenta do reino, cv. Bragantina, é negativamente afetada por infecção de *Fusarium solani* f.sp. *piperis* em estágio inicial, e por estresse hídrico leve.

Palavras-chave: *Piper nigrum* L. Manejo da irrigação. Biofungicida. Fluorescência da clorofila *a*.

5.2 ABSTRACT

In addition to being sensitive to water stress, the culture of black pepper (*Piper nigrum* L.) can be affected by several types of diseases. An important phytosanitary problem faced by Brazilian pepper producers is Fusariosis, a disease caused by the soil fungus *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, for which there is no effective chemical control or resistant cultivar. The use of bioagents for the control of plant diseases has been growing in recent years, in view of the resulting low environmental impact, as well as its wide capacity for action, however, there is still few informations about its effect on Fusariosis. The aim of this work was to evaluate the photosynthetic efficiency and growth of black pepper plants, cv. Bragantina, submitted to different irrigation regimes (IR), application of products based on *Trichoderma* spp. and inoculation with *Fusarium solani* f.sp. *piperis*. Four IRs were tested, referring to 41% (IR 41), 59% (IR 59), 79% (IR 79) and 100% (IR 100) of the reference irrigation depth. A set of 150-day-old plants were used, grown in pots with a capacity of 800 cm³, filled with substrate composed of 50% biosolid, 25% crushed coconut fiber and 25% granite rock powder (% vol.). At 60 days prior to transplanting, the substrates were treated with commercial products based on *Trichoderma harzianum* (TH), *Trichoderma asperellum* (TA) or *Trichoderma stromaticum* (TS), in the dosages of 2.4 x 10⁴, 1.79 x 10³ and 4.56 x 10⁵ CUF g⁻¹ substrate, respectively. The controls consisted of treatment with systemic fungicide based on Carbendazim (FG) and distilled water (TT). The inoculation with the phytopathogen (FSP) was done by immersing the roots in spore suspension (10⁵ UFC mL⁻¹), at the time of transplanting, and the control (TF) was made by immersing the roots in distilled water. The observation period was 180 days, counted from the transplant, when the number of leaves (NL), leaf area (LA), fresh and dry leaf mass (FLM and DLM, respectively), fresh and dry stem mass (FSM and DSM, respectively), and dry mass of root system (DMRS). At 160, 170 and 180 days after transplanting, the length of the main stem (H), chlorophyll a (CLa) and chlorophyll b (CLb) indexes, and chlorophyll a fluorescence were evaluated. The experimental design was completely randomized, in a 5 x 2 x 4 factorial scheme (*Trichoderma* spp., FSP and IR, respectively), with five replications. The results showed the influence of the IRs on the growth of black pepper plants, with an increase in the values of all the biometric variables studied, due to the increase in IR. The application of *Trichoderma asperellum* in the substrate provided an increase of 14% in the NL and of *Trichoderma harzianum* reduction of 20%, in comparison with the control. The application of *Trichoderma stromaticum* increased the accumulation of DMRS by 28%, compared to the control, and of *Trichoderma harzianum*, a decrease of 53%. For the three sampling times, the highest indices of photosynthetic performance were observed in non-inoculated plants (TF) and submitted to IR 41, while the smallest were observed in inoculated plants (FSP), under IR 100. The increase in IRs provides an increase in the length of the main stem and accumulation of dry matter in young black pepper plants, cv. Bragantina. The treatment of substrates with commercial products based on *Trichoderma asperellum* and *Trichoderma stromaticum* favors the growth of young black pepper plants, cv. Bragantina, which is negatively affected by treatment with *Trichoderma harzianum*. The photosynthetic efficiency of young black pepper plants, cv. Bragantina, is negatively affected by infection of *Fusarium solani* f.sp. *piperis* at an early stage, and by mild water stress.

Key words: *Piper nigrum* L. Irrigation schedule. Chlorophyll a Fluorescence.

5.3 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos mais importantes produtores mundiais de pimenta do reino (*Piper nigrum* L.), sendo esta cultura mais difundida nos estados do Pará e Espírito Santo, os quais representam mais de 90% do total produzido nacionalmente (IBGE, 2019). As principais regiões produtoras destes estados estão situadas no Nordeste Paraense e no Norte Capixaba. Esta última região é caracterizada por elevados déficits hídricos (RODY et al., 2010), o que, associado ao fato de ser a pimenta do reino uma planta sensível à estresses hídricos (KRISHNAMURTHY et al., 2016), torna mais desafiadora a atividade para produtores localizados nesta região.

Estresses hídricos afetam negativamente a cultura da pimenta do reino, sobretudo durante as fases compreendidas entre o florescimento e o desenvolvimento das bagas, o que se reflete negativamente na produtividade. Quando incide durante os estágios iniciais, no entanto, características como expansão foliar, balanço fotossintético e transpiração é que são negativamente afetados (SIVARAMAN et al., 1999), podendo reduzir a qualidade das mudas produzidas.

Neste sentido, o manejo adequado da água a ser aplicada via irrigação, deve levar em consideração o uso da água de forma responsável, sustentável e racional, o que pode ser perseguido pela adoção de diversas ações, as quais ensejarão a aplicação de lâminas de irrigação adequadas às demandas hídricas das plantas, de formas e em momentos em que as perdas sejam as menores possível (CARVALHO e OLIVEIRA, 2012).

Para isso, no entanto, são necessários dados referentes ao consumo hídrico das plantas, de preferência adequados às regiões onde as plantações estejam localizadas, ou mesmo a resposta das plantas cultivadas a certas situações, como déficit hídrico em determinadas fases de desenvolvimento, sem que isso represente redução lucratividade. Entretanto, ainda são raras informações deste tipo para a cultura da pimenta do reino, sobretudo para as condições brasileiras, em termos de manejo e de cultivares.

Outro problema enfrentado por produtores nacionais de pimenta do reino é a Fusariose, uma doença de solo causada pelo fungo *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (ALBUQUERQUE, 1961), para a qual não se conhece cultivar resistente, ou mesmo controles químico ou biológico eficazes (CASTRO et al., 2016). Alguns produtos alternativos foram testados para o controle da doença (BENCHIMOL et al., 2000, 2017; BENCHIMOL; SUTTON e DIAS-FILHO, 2006), entretanto, sem que se tenha chegado a uma solução definitiva para o problema, sendo recomendadas medidas preventivas de controle.

Fungos do gênero *Trichoderma* apresentam potencial biocontrolador sobre diversos tipos de doenças de plantas (ROJO et al., 2007; SAITER et al., 2016), além de serem potenciais agentes promotores de crescimento de plantas (HERRERA-PARRA; CRISTÓBAL-ALEJO e RAMOS-ZAPATA, 2017), entretanto, tais características variam conforme a interação com o alvo, a interação com a planta hospedeira e com fatores abióticos (HARMAN et al., 2004), devendo assim, serem estes testados sob as mais diversas condições.

Mesmo diante da importância da cultura da pimenta do reino para agricultura brasileira, e dos desafios enfrentados pelos agricultores, ainda são relativamente escassos na literatura, dados que tratam da interação entre o ambiente agrícola e diversos agentes biológicos presentes no agroecossistema da pimenticultura nacional, assim como o uso de técnicas avançadas de detecção de alterações fisiológicas em plantas nestes ambientes.

Diante disso, os objetivos do presente trabalho foram avaliar o desenvolvimento vegetativo e a eficiência fotossintética de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, inoculadas com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, na presença de fungos do gênero *Trichoderma*, sob diversos regimes de irrigação.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido entre 28/02/2019 e 27/08/2019 em uma casa de vegetação (Van der Hoeven Estufas Agrícolas e Galvanização a Fogo, Artur Nogueira, São Paulo, Brasil), instalada no sentido Leste-Oeste, no campus da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em Seropédica-RJ (22° 45' 49,41" S e 43° 41' 50,77" - 33 m de altitude). As laterais e o teto da casa de vegetação eram fechados com lona plástica translúcida de 150 micra, enquanto o piso era de concreto.

O clima local foi classificado como tropical chuvoso e chuvas de verão, tipo Aw, conforme a classificação de Köppen, ocorrendo concentração das chuvas no período outubro-março e temperatura média anual de 24,5 °C (BARROS et al., 2009). Embora a casa de vegetação possuísse sistemas de controle de temperatura interna por circulação de ar e de umidade relativa do ar por nebulização, durante o experimento somente o primeiro foi utilizado, visando evitar interferências no tratamento de irrigação.

Foram utilizadas mudas de pimenta do reino, cultivar Bragantina, com 150 dias de idade, obtidas em um viveiro comercial situado em São Roque do Canaã/ES. No momento do transplantio as plantas apresentavam H média de 28,1 cm ± 5,5 cm. O processo de propagação pelo qual as mudas foram produzidas no viveiro comercial foi estaquia, utilizando como unidade propagativa estacas com dois nós.

A preparação das mudas para o transplantio foi iniciada com a lavagem das raízes em água corrente, visando a remoção dos substratos em que as mesmas foram produzidas. Em seguida, procedeu-se a inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (FSP). Para isso, o sistema radicular das plantas foi imerso por cinco minutos em uma suspensão de esporos do fitopatógeno, cuja concentração era de 10⁵ unidades formadoras de colônia (UFC) mL⁻¹. As testemunhas (TF) consistiram na repetição desses procedimentos, porém, ao invés de suspensão de esporos, foi utilizada água destilada.

A suspensão de esporos foi preparada no Laboratório de Epidemiologia e Patologia de Sementes/UFRRJ, a partir de colônias do isolado 2350, pertencente à Coleção Micológica da Universidade Federal de Lavras, as quais foram cultivadas em placas de Petri contendo meio BDA (batata, dextrose e ágar), em uma estufa incubadora BOD, por 20 dias, em escuro, a 25 °C. Após este período as placas foram retiradas da estufa, e levadas para uma câmara de fluxo laminar, onde foi adicionado 20 mL de água destilada e autoclavada às placas. Em seguida, as colônias foram cuidadosamente raspadas com auxílio de um pincel de cerdas macias, após o quê, procedeu-se a filtração do líquido mediante o uso de uma peneira de malha fina. A contagem dos esporos foi realizada em câmara de Neubauer, e a concentração final foi obtida por meio de diluição seriada do filtrado.

Ao fim do processo de inoculação as plantas foram transferidas para vasos plásticos, do tipo embalagem para mudas, com capacidade de 0,8 L (Nutriplan, Cascavél/PR), preenchidos com substrato não autoclavado e tratado com *Trichoderma* spp., conforme descrito mais adiante. Os vasos permaneceram sobre bancadas de ferro a 0,8 m de altura, em relação ao piso da casa de vegetação, e foram posicionados de forma equidistantes, de tal forma que a densidade de plantio inicial foi de 25 plantas m⁻². Aos 80 DAT houve a necessidade de aumento do espaçamento entre plantas, visando evitar a sobreposição de copas, passando para 15 plantas m⁻² a densidade de plantio.

O substrato utilizado foi obtido pela mistura de biossólido, fibra de coco triturada e pó de rocha granítica, na proporção de 2:1:1, em base de volume, com auxílio de uma betoneira, até homogeneidade. O substrato apresentou as seguintes características químicas: pH(água) = 5,8;

condutividade elétrica = $1,8 \text{ mS cm}^{-1}$; $N = 7,5 \text{ g kg}^{-1}$; $P = 27,0 \text{ mg dm}^{-3}$; $K = 2,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $Ca = 18,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $Mg = 2,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $H + Al = 2,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; CTC Efetiva = $24,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; e Valor V = 91,8%.

O biossólido foi produzido e fornecido pela Companhia Estadual de Águas e Esgoto do Rio de Janeiro – CEDAE, e era proveniente da estação de tratamento de esgoto Ilha do Governador. A fibra de coco triturada tratava-se do produto comercial Golden Mix granulado, Tipo 11 (Amafibra, Artur Nogueira/SP). O pó de rocha granítica foi fornecido por uma serraria de blocos de mármore e granito, localizada em Marechal Floriano/ES, e foi gerado durante o processo de beneficiamento de rochas ornamentais, pelo método do tear, mediante corte com granalha de ferro e óxido de cálcio.

O tratamento à base de *Trichoderma* spp. consistiu na aplicação de suspensões de esporos, nas dosagens $2,4 \times 10^4 \text{ UFC g}^{-1}$ substrato [*Trichoderma harzianum* (TH)]; $1,79 \times 10^3 \text{ UFC g}^{-1}$ substrato [*Trichoderma asperellum* (TA)]; e $4,56 \times 10^5 \text{ UFC g}^{-1}$ substrato [*Trichoderma stromaticum* (TS)] 60 dias anteriores ao transplante e diretamente nos vasos aos três dias após o transplante. Foram utilizados produtos comerciais cujos ingredientes ativos eram cada uma das espécies de *Trichoderma* testadas. Nenhum desses produtos estava registrado para a cultura da pimenta do reino, por isso, as dosagens foram definidas conforme as recomendações dos fabricantes para as culturas alvo. Um dos tratamentos testemunha consistiu na administração de fungicida sistêmico à base de Carbendazim diretamente nas folhas aos três DAT (FG). A concentração da calda era 500 mg de produto comercial por litro, conforme recomendação do fabricante. A testemunha absoluta (TT) consistiu na aplicação de 20 mL de água destilada diretamente nos substratos aos três DAT.

Para a aplicação aos 60 dias anteriores do transplante, o substrato foi espalhado sobre lonas plásticas (uma para cada tratamento), em camadas de aproximadamente 5 cm, sendo a aplicação realizada com auxílio de uma bomba costal, de tal forma a distribuir da melhor maneira possível as suspensões sobre o material (Figura 15).



Figura 15. Aplicação de produtos comerciais à base de *Trichoderma* spp. em substrato para a produção de mudas de pimenta do reino.

A aplicação das suspensões de esporos aos três DAT foi feita de forma direta, tendo-se adicionado 20 mL planta⁻¹, conforme as concentrações citadas anteriormente (TH, TA e TS), com auxílio de uma seringa graduada, sendo empregada uma para cada tratamento, visando evitar contaminação.

O suprimento de água foi realizado por meio de um sistema de microirrigação por gotejamento, composto por mangueiras de irrigação de 17 mm de diâmetro, gotejadores autocompensantes (NETAFIM BRASIL, Ribeirão Preto/SP), uma bomba hidráulica com 1/4 CV de potência e diversos controles eletroeletrônicos. Conforme o teste de desempenho, executado sob pressão de serviço de 6 mca, verificou-se coeficiente de uniformidade de Christianssen (CUC) de aproximadamente 97,7%, coeficiente de distribuição (CUD) de 95,6% e vazões efetivas de 1,87; 2,71; 3,63 e 4,57 L h⁻¹.

Durante o experimento a irrigação foi manejada sob tensão de 4 kPa até 90 DAT, passando-se para 10 kPa a partir desta data, o que perdurou até o fim do período de observações. Esse ajuste foi necessário em função da necessidade de adaptação inicial das plantas após o estresse causado pelo transplante, estendendo esse tipo de manejo até 90 DAT. Após este período, passou-se a adotar o conceito de água disponível, o qual, conforme Fermino (2014), é a água retida a uma tensão de 10 kPa. Os manejos foram realizados considerando duas plantas definidas aleatoriamente, dentre as testemunhas absolutas (TF) dos tratamentos à base de *Fusarium solani* f.sp. *piperis* e *Trichoderma* spp. (TT), e que foram irrigadas com vazão de 4,57 L h⁻¹. Essas plantas foram as de referência para fins de irrigação (PRI), de tal forma que o número e a duração das irrigações dependeram de sua demanda hídrica.

O manejo a 4 kPa foi realizado de forma automatizada mediante uso de acionadores simplificados de irrigação - ASI (Medici et al., 2010). Cada acionador foi construído com uma capsula porosa de 10 cm de comprimento por um centímetro de diâmetro, aproximadamente. As velas utilizadas foram esculpidas a partir de velas de filtro comum de água. A vela foi conectada a um pressostato normalmente utilizado em máquina doméstica de lavagem de roupas (sensor de nível) por meio de uma mangueira de nível utilizada na construção civil, com aproximadamente 120 cm de comprimento. Após vedação da conexão da mangueira com a vela, o sistema foi preenchido com água, ao qual foi conectado o pressostato, vedando-se também a conexão deste com a mangueira de nível. Logo após, as velas foram inseridas nos vasos das PRIs, a uma profundidade de 10 cm, contados a partir da superfície dos substratos, posicionando-se os pressostatos 40 cm de desnível em relação ao centro das capsulas, equivalendo à tensão de aproximadamente 4 kPa.

Para o manejo a 10 kPa foram construídos tensiômetros de tamanho reduzido, nos quais foram utilizados sensores eletrônicos baseados em plataformas de prototipagem Arduino (MONK, 2013), programados para realizar leituras de sinais emitidos por sensores de tensão a cada 13 segundos. Foram utilizados sensores eletrônicos de tensão, modelo MPX5100DP (NXP Semiconductors – Eindhoven, Holanda), os quais foram instalados nas tampas roscáveis de tubetes de polietileno rígido, com diâmetro de dois centímetros. Na parte inferior desses tubetes foram instaladas cápsulas porosas utilizadas em tensiômetros. Todas as junções, com exceção da rosca da tampa, foram vedadas com cola especial para evitar a entrada de ar no sistema. Os tensiômetros foram então preenchidos com água, fechados, e instalados nos vasos das mesmas PRIs, onde estavam instalados os dispositivos ASI. As cápsulas porosas ficaram a uma distância de 10 centímetros de profundidade, em relação à superfície dos substratos. Na Figura 16 estão representados os esquemas de funcionamento dos dispositivos utilizados.

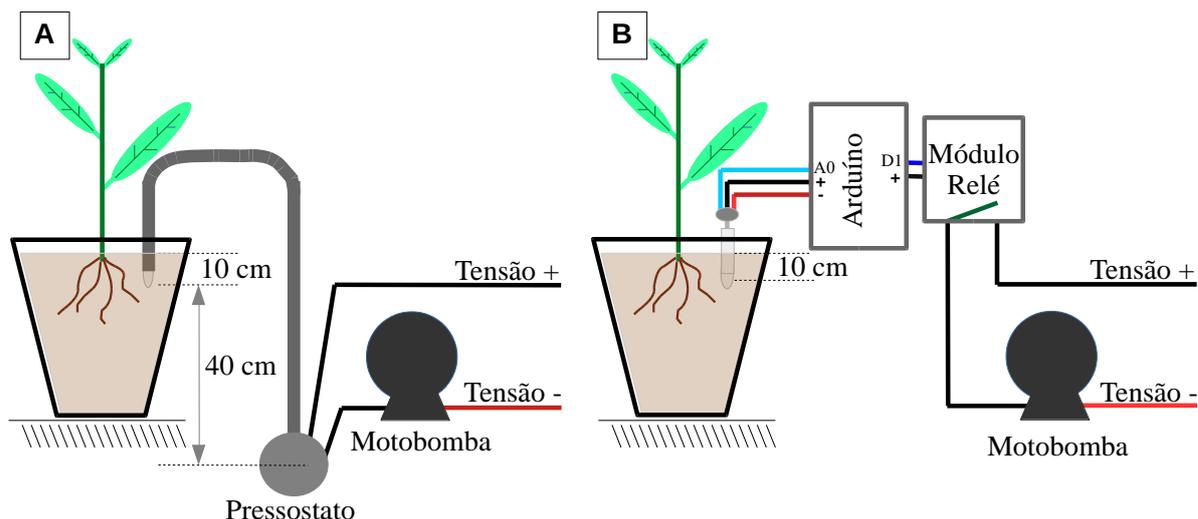


Figura 16. Esquema de ligação dos dispositivos ASI utilizados até 90 DAT (A) e sensores eletrônicos baseados em placas de prototipagem Arduino utilizados de 91 a 180 DAT (B). Figura A – Uma vez atingida a tensão de retenção de água crítica no substrato (4 kPa), a chave mecânica interna do pressostato mudava da posição “aberto” para “fechado”, permitindo a alimentação elétrica da motobomba, iniciando a irrigação. Reestabelecida a tensão de equilíbrio (próximo de 0 kPa), a chave retornava para a posição “aberta”, cessando a irrigação; Figura B – A placa Arduino realizava leituras dos sensores de tensão em intervalos de 13 s, através da entrada analógica “A0”. Atingida a leitura referente a tensão crítica (10 kPa), a placa emitia uma tensão de 5 volts para o módulo relé através do pino digital “D1” por 15 s, e este módulo, por sua vez, permitia a passagem da tensão positiva até a motobomba, pressurizando o sistema de irrigação. Após este período a placa desligava o sinal do pino “D1” por 5 minutos, cessando a pressurização do sistema. Após este período era realizada novamente a leitura dos sensores, constatando-se o não atingimento da tensão de 1 kPa (limite inferior estabelecido), o processo de pressurização do sistema de irrigação era reiniciado, até que esta condição fosse constatada.

Operando da forma descrita, independente da tensão de manejo, foi possível estabelecer os tratamentos de irrigação, que consistiram na aplicação de quatro regimes de irrigação (RI), equivalentes a 41 (RI 41), 59 (RI 59), 79 (RI 79) e 100% (RI 100) da lâmina de irrigação de referência (LIR). A definição desses RIs se deu pela relação percentual mantida entre as vazões dos gotejadores utilizados, considerando a vazão de $4,57 \text{ L h}^{-1}$ como a garantidora de 100% da LIR.

No interior da casa de vegetação foram instalados uma estação meteorológica modelo WatchDog 2000 Series (Spectrum Technologies, Illinois/EUA) e um termohigrógrafo digital modelo IP-747RH (Impac Instrumentos de Medição, São Paulo/SP), para o monitoramento da variação climática. Em função disso, na Figura 17 estão representados os valores temperatura e umidade relativa registrados, e, na Figura 18 os valores de radiação solar total diária registrados no interior da casa de vegetação.

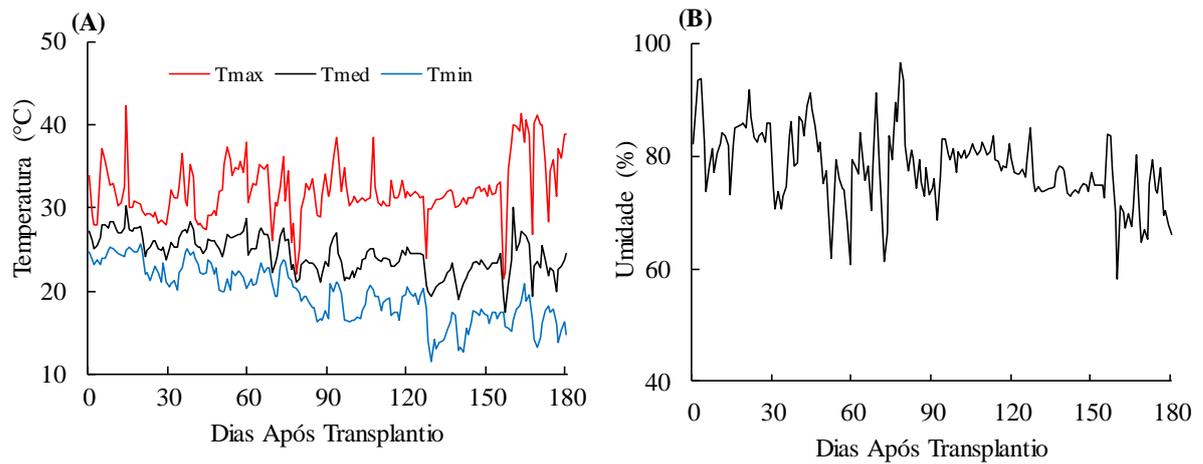


Figura 17. Valores diários de temperatura média (Tmed), mínima (Tmin) e máxima (Tmax) (A) e umidade relativa do ar média (B), registrados no interior da casa de vegetação durante o período de avaliação.

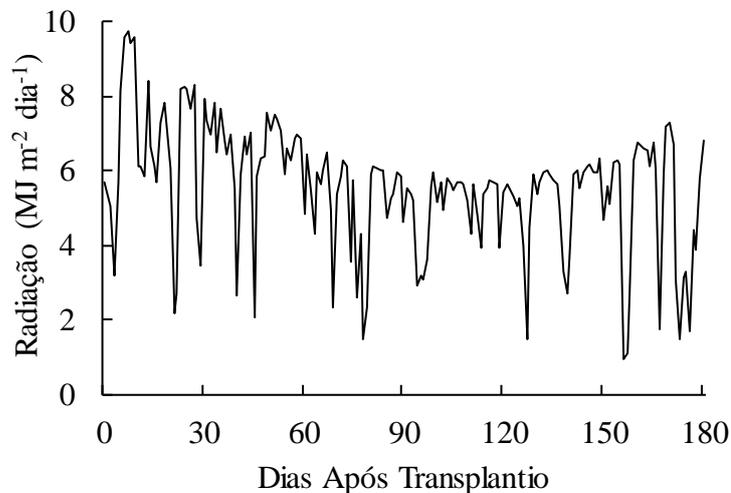


Figura 18. Radiação solar total diária registrada no interior da casa de vegetação durante o período experimental.

A partir dos 35 DAT foram observados sintomas típicos de antracnose causada por *Colletotricum gloeosporioides* em algumas plantas, com surgimento de lesões necróticas no ápice das folhas e amarelecimento no entorno das lesões (Figura 19). Como o surgimento desta doença pode ser associado à deficiência nutricional por potássio (TREMACOLDI, 2010), foram coletadas amostras de substratos em plantas sintomáticas, para avaliação do teor disponível do nutriente. Os resultados revelaram teores considerados baixos para a cultura ($44,3 \text{ mg dm}^{-3}$), conforme Prezotti et al. (2007). Desta maneira, aos 50 e 144 DAT foi aplicado diretamente sobre os substratos cerca de $0,375 \text{ g K}_2\text{O}$ por planta, sob a forma de KCl, diluído em 50 mL de água destilada.



Figura 19. Folhas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, com sintomas de antracnose causada por *Colletotricum gloeosporioides*.

Aos 30, 60, 80, 100, 130, 160 e 170 DAT foram realizadas medidas de comprimento da haste principal (H) e índices de clorofila a (CLa) e b (CLb). A medição de H foi realizada de forma direta, mediante uso trena. As avaliações de CLa e CLb foram realizadas com uso de um clorofilômetro marca ClorofiLOG®, modelo CFL1030 (Falker, Porto Alegre/RS), sempre em uma folha jovem e completamente expandidas de cada planta.

Aos 180 DAT, além de H, foi realizada a avaliação de massas fresca (MFF) e seca de folha (MSF), área foliar total (AF), massa fresca (MFC) e seca de caule (MSC) e massa seca de sistema radicular (MSR). A variável H foi determinada diretamente ainda com a planta nos vasos. Após esta avaliação, as plantas foram colhidas, mediante corte logo acima do nó remanescente da estaca, e divididas em folhas e caule, para a determinação de MFF e MFC, respectivamente, mediante pesagem em balança analítica. Logo em seguida a área das folhas, contabilizada em termos de plantas, foi determinada em um integrador de área foliar modelo LI-3100 (LI-COR, Nebraska, EUA), sendo possível a determinação de AF. A MSR foi determinada após remoção dos substratos em água confinada, para que não ocorresse contaminação da área com fitopatógeno, sendo possível a separação do sistema radicular de cada planta. Esse material foi seco em estufa de circulação forçada a 65 °C por 72 h, ou até massa constante, sendo possível obter MSR pela pesagem em balança analítica. Pelo mesmo método de secagem e pesagem, foi possível obter os valores de MSF e MSC, a parti de MFF e MFC, respectivamente.

Aos 160, 170 e 180 DAT foram realizadas avaliações de fluorescência transiente OJIP da clorofila *a*, mediante uso de um fluorímetro Handy PEA (Hansatech Instruments, Kings Lynn Norfolk, UK). Os transientes foram induzidos por uma luz vermelha com frequência de 650 nm e intensidade de 3.000 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A aquisição de dados ocorreu a cada 10 μs entre 10 μs e 0,3 ms, a cada 0,1 ms entre 0,3 ms e 3 ms, a cada 1 ms entre 3 ms e 30 ms, a cada 10 ms entre 30 e 300 ms e a cada 100 ms entre 300 ms e 0,8 s. As medições foram realizadas em folhas completamente expandidas, ainda inseridas nas plantas (uma em cada planta), as quais foram adaptadas ao escuro por 30 (trinta) minutos antes das medições, com auxílio de grampos especiais. As avaliações foram realizadas nas mesmas folhas em que foram medidos os índices de CLa e CLb.

Os valores médios do transiente OJIP da fluorescência da CLa dos tratamentos referentes aos RIs (RI 41, RI 59, RI 79 e RI 100) e inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (FSP e TF) foram analisados por meio do teste JIP (STRASSER; TSIMILLI-MICHAEL e

SRIVASTAVA, 2004), mediante uso do software Biolyzer (Laboratory of Bioenergetics, University of Geneva, Switzerland). As diferenças entre os dez transientes gerados foram avaliadas por meio dos cálculos de fluorescência relativa (W) entre as fases O e K [$(W_{OK} = (F_t - F_0)/(F_K - F_0))$], referentes a 50 μ s e 300 μ s, respectivamente, e O e J (2 ms) [$(W_{OJ} = (F_t - F_0)/(F_J - F_0))$], os quais foram normalizados e apresentados como diferenças cinéticas (ΔW) em comparação com o tratamento RI 100 / TF [$\Delta W_{OK} = W_{OK} - (W_{OK})_{Test}$] e [$\Delta W_{OJ} = W_{OJ} - (W_{OJ})_{Test}$], identificado nas equações pelo subscrito “Test”.

As diferenças cinéticas ΔW_{OK} (Banda L) e ΔW_{OJ} (Banda K) são indicadores de conectividade energética ou agrupamento entre unidades do fotossistema - FSII (CE) e de estabilidade do complexo de evolução do oxigênio (EO), respectivamente (STRASSER; SRIVASTAVA e GOVINDJEE, 1995). Logo, valores negativos de ΔW_{OK} indicam maior CE, resultando em melhor utilização da energia de excitação e estabilidade do sistema, em comparação com o tratamento de referência (YUSUF et al., 2010), enquanto valores negativos de ΔW_{OJ} denotam maior EO.

A partir dos parâmetros básicos do teste JIP, foram obtidos os seguintes parâmetros biofísicos, para fins de comparações quantitativas (TSIMILLI-MICHAEL, 2019): $ABS/RC = M_0 \times (1/V_j) \times (1/\phi_{PO})$ – fluxo de absorção (excitação de moléculas de CLa na antena FSII) por centro de reação (RC); $TR_0/RC = M_0 \times (1/V_j)$ - fluxo de energia capturado (levando à redução de Q_A^-), por RC; $ET_0/RC = M_0 \times (1/V_j) \times (1 - V_j)$ - fluxo de transporte de elétrons (além da Q_A^-), por RC; $RE_0/RC = M_0 \times (1/V_j) \times (1 - V_I)$ – fluxo de redutores e aceptores finais de elétrons no lado acceptor fotossistema I (FSI), por RC; $TR_0/ABS = \phi_{P_0} = [1 - (F_0/F_M)]$ - rendimento quântico máximo para a fotoquímica primária; $ET_0/ABS = \phi_{E_0} = [1 - (F_0/F_M)] \cdot (1 - V_j)$ - rendimento quântico do transporte de elétrons (ET); $RE_0/ABS = \phi_{R_0} = [1 - (F_0/F_M)] \cdot (1 - V_I)$ – rendimento quântico de redução do acceptor final de elétrons no lado acceptor FSI; $ET_0/TR_0 = \Psi_{EO} = (1 - V_j)$ - eficiência/probabilidade que um elétron se move além de Q_A^- ; $RE_0/ET_0 = \delta_{R_0} = (1 - V_I)/(1 - V_j)$ - eficiência com a qual um elétron doo intersistema carreador de elétrons é transferido para reduzir os receptores finais de elétrons finais no lado acceptor FSI; PI_{ABS} - índice de performance para conservação de energia a partir de fótons absorvidos pelo FSII, até a redução do intersistema acceptor de elétrons; e $PI_{Total} =$ índice de performance para conservação de energia a partir de fótons absorvidos pelo FSII, até a redução dos aceptores finais de elétrons FSI.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 5 x 4 (inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, aplicação de *Trichoderma* spp. e RIs, respectivamente), com cinco repetições por tratamento. Visando aferir o atendimento dos pressupostos básicos para a análise de variância – ANOVA, a normalidade e homogeneidade dos resíduos foram verificadas pelos testes de Lilliefors e Bartlett, respectivamente, ambos a 5% de significância. Por não apresentarem ao menos distribuição normal dos resíduos, as seguintes variáveis MSR, MSC e VR necessitaram de transformação, sendo a primeira em \sqrt{x} , e as demais em Box-Cox (BOX; COX, 1964). Rejeitada a hipótese nula durante a Anova, realizou-se o teste de média de Tukey a 5% de probabilidade para os fatores qualitativos e análise de regressão para NI, considerando o nível de significância de 5% em ambos os casos. As análises foram realizadas com auxílio do programa computacional R (R CORE TEAM, 2019).

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de observações ocorreram 107 eventos de irrigação, os quais iniciaram aos 16 DAT, com intervalo médio de 1,5 dias entre eventos (Figura 20).

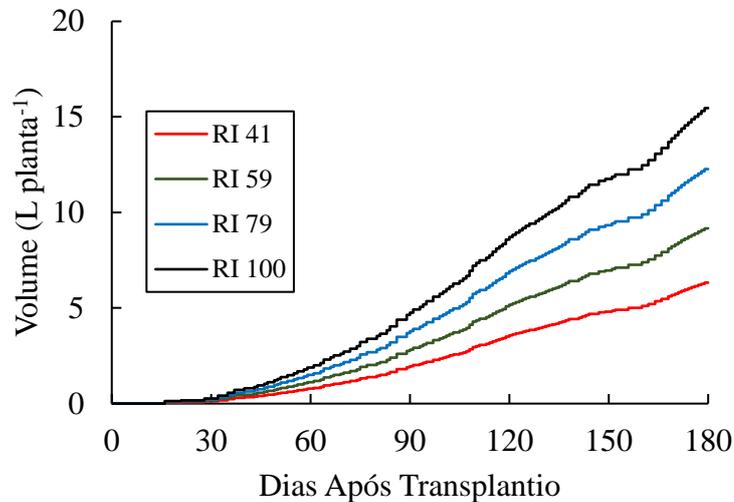


Figura 20. Volume acumulado de água, aplicado em plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, conforme regimes de irrigação equivalentes a 41% (RI 41), 59% (RI 59), 79% (RI 79) e 100% (RI 100) da lâmina de irrigação de referência.

Durante o período experimental, os volumes aplicados via sistema de irrigação somaram 6,3 L planta⁻¹ (RI 41), 9,2 L planta⁻¹ (RI 59), 12,3 L planta⁻¹ (RI 79) e 15,5 L planta⁻¹ (RI 100). A água aplicada até 90 DAT correspondeu a 32% do total, para todos os tratamentos (Figura 20). Embora se tenha optado por alterar o tipo de manejo a partir de 90 DAT, não foram observadas alterações importantes quanto ao número de acionamentos, ocorrendo quase que diariamente, principalmente a partir dos 45 DAT, quando as plantas já estavam bem adaptadas à condição de cultivo (Figura 20).

5.5.1 Análise de Crescimento

Houve aumento H em função do aumento do volume de água aplicado para todos os RIs ao longo do experimento. Entretanto, até 100 DAT o tratamento RI 41 proporcionou menores taxas de crescimento, enquanto maiores as taxas ocorreram sob RI 100 (Figura 21). A partir desta data, até os 160 DAT, o crescimento das plantas submetidas aos tratamentos RI 41 e RI 59 foi intenso, praticamente igualando os demais tratamentos, em termos de velocidade de crescimento. A partir de então, até o final do experimento, a taxa de crescimento voltou a ser mais lenta para plantas submetidas a RI 41 e RI 59, em detrimento aos demais (Figura 21).

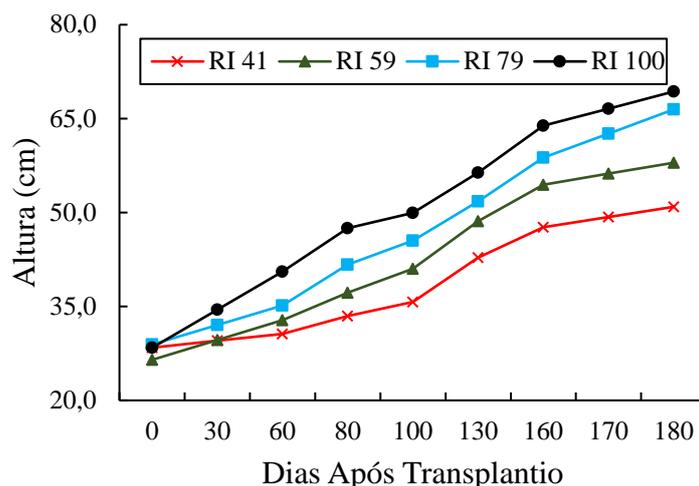


Figura 21. Curvas de crescimento (altura média) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, sob diferentes regimes de irrigação, aos 0, 30, 60, 80, 100, 130, 160, 170 e 180 dias após o transplante (DAT). RI 100 – 100% da lâmina de irrigação de referência (LIR); RI 79 – 79% da LIR; RI 59 – 59% da LIR; e RI 41 – 41% da LIR.

De maneira geral, os índices de CLA e CLb oscilaram de forma semelhante ao longo do experimento, apresentando valores praticamente estáveis dos 30 aos 60 DAT, um decréscimo acentuado dos 60 aos 100 DAT, e relativa estabilização até o final do experimento (Figura 22).

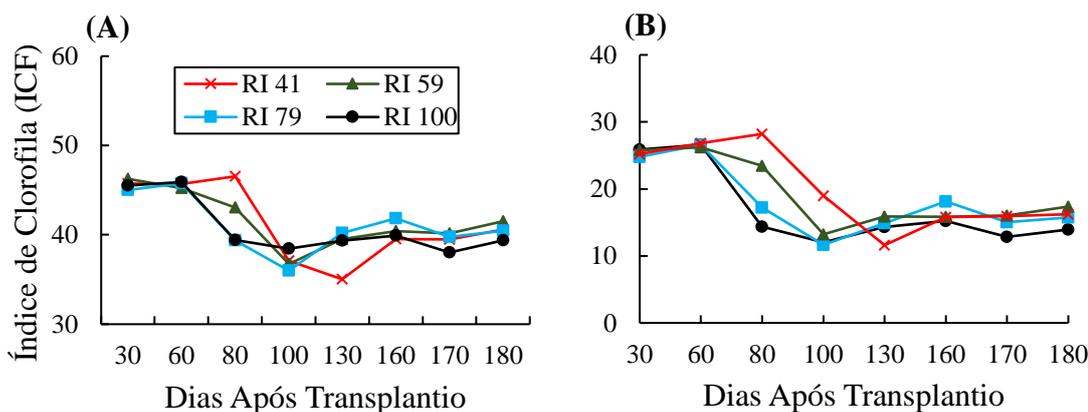


Figura 22. Índice de clorofila a (A) e clorofila b (B) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 30, 60, 80, 100, 130, 160, 170 e 180 DAT. ICF – Índice de clorofila Falker; RI ** - regime de irrigação referente a 41% (RI 41); 59% (RI 59), 79% (RI 79) e 100% (RI 100) da lâmina de irrigação de referência.

Maiores diferenças entre os regimes de irrigação ocorreram aos 80 e 130 DAT para CLA, com maiores valores referentes a RI 41 e RI 59 (80 DAT) e menor valor referente a RI 41 aos 130 DAT (Figura 22A). Para CLb foram observados maiores valores associados a RI 41 e RI 59 aos 80 DAT, e associado a RI 41 aos 100 DAT, com queda acentuada até 130 DAT, quando esse tratamento apresentou menor valor de CLb (Figura 22B). Tal fato pode estar associado a alteração da tensão do manejo de irrigação ocorrida aos 90 DAT, quando esta passou de 4 kPa para 10 kPa, ocorrendo aceleração do crescimento, o que pode ter feito com que as folhas aumentassem de área, distribuindo as moléculas de clorofila, de tal forma a não concentrar o pigmento, como ocorre em folhas com menor área.

De uma forma geral, foram observadas correlações altas, positivas e significativas ($p < 0,01$) entre as variáveis biométricas avaliadas aos 180 DAT. Dentre estas, as correlações entre MSF com MSC, AF e MFF; NF com MFC, MSC, AF e MFF; MFC com MSC, AF e MFF; e MSC com AF e MFF, que foram superiores a 0,9 (Figura 23).

	H	MSF	NF	MFC	MSC	AF	MFF
MSR	0.66	0.79	0.75	0.75	0.84	0.83	0.8
H		0.75	0.8	0.84	0.81	0.84	0.83
MSF			0.83	0.87	0.94	0.91	0.94
NF				0.97	0.92	0.93	0.93
MFC					0.94	0.94	0.95
MSC						0.95	0.95
AF							0.98

Figura 23. Coeficientes de correlação linear de Pearson de variáveis biométricas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT. H – Altura de plantas; NF – número de folhas; AF – área foliar; MFF – massa fresca de folhas; MSF – massa seca de folhas; MFC – massa fresca de caule; MSC – massa seca de caule; e MSR – massa seca de sistema radicular.

As variáveis com maior correlação foram AF e MFF (0,98), enquanto as de menor correlação foram AF e H (0,66) (Figura 23).

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados da análise de variância para as variáveis biométricas avaliadas.

Tabela 13. Níveis de significância ($Pr > Fc$) de fatores sobre variáveis biométricas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, submetidas a diferentes tratamentos, aos 180 DAT. (continua)

FV	H	NF	AF	MFF	MSF	MFC	MSC	MSR
FUS	ns							
TRICH	ns							
RI	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
FUS*TRICH	0,02	< 0,01	ns	ns	ns	< 0,01	ns	0,02
FUS*RI	ns							

Tabela 13. Continuação.

FV	H	NF	AF	MFF	MSF	MFC	MSC	MSR
TRICH*RI	0,04	ns	ns	0,01	ns	0,02	ns	ns
FUS*TRICH*RI	ns							
CV (%)	22,5	32,2	27,0	23,8	28,6	26,0	30,8	19,7

FV – Fonte de variação; FUS – inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* + testemunha; TRICH – inoculação com *Trichoderma* spp. + testemunhas; RI – regimes de irrigação; CV – coeficiente de variação; H – altura de plantas; NF – número de folhas; AF – área foliar; MFF – massa fresca de folhas; MSF – massa seca de folhas; MFC – massa fresca de caule; MSC – massa seca de caule; MSR – massa seca de sistema radicular; e ns – não significativo pelo teste F ($p > 0,05$).

Os RIs influenciaram significativamente ($p < 0,05$), independente dos demais fatores, as variáveis NF, AF, MSF, MSC e MSR. O efeito de RI dependeu do efeito da aplicação de *Trichoderma* spp., e vice-versa, para H, MFF e MFC. Por fim, a interação entre o tratamento à base de *Trichoderma* spp. e de *Fusarium solani* f.sp. *piperis* influenciou de maneira significativa H, NF, MFC e MSR (Tabela 13).

Na Figura 24 estão apresentadas as análises de regressão para MSF, MSC e MSR em função dos RIs. Quanto maiores foram os RIs, maiores foram os valores de MSF, MSC e MSR aos 180 DAT, sendo que, conforme os modelos lineares ajustados, mais que 96% da variabilidade destas variáveis, pôde ser explicada pela variabilidade de RI (Figura 24).

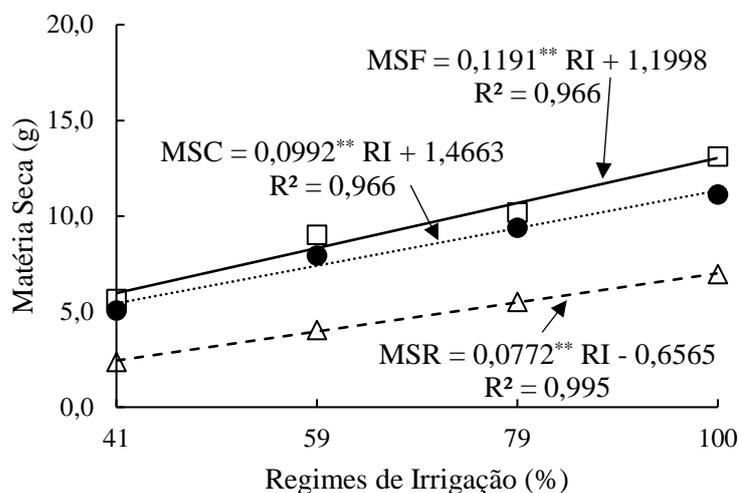


Figura 24. Regressão linear de massa seca de folhas (MSF), caule (MSC) e sistema radicular (MSR) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, em função de regimes de irrigação (RI). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Por outro lado, houve acréscimo de matéria seca, conforme o aumento do RI, com aumentos de 1,2 g para MSF, 1,0 g para MSC e 0,8 g para MSR, para um aumento em 10% no RI (Figura 24). O acúmulo de matéria seca em uma planta C3 típica varia de 375 a 625 g de água para cada 1 g de matéria seca (TAIZ et al., 2017). Os valores obtidos no presente trabalho estão situados nesta faixa: 481 (RI 41), 438 (RI 59), 490 (RI 79) e 497 (RI 100) g de H₂O consumida por grama de matéria seca produzida (Figura 20 e Figura 24).

Na Figura 25 estão apresentadas as análises de regressão para AF e NF, em função dos RIs.

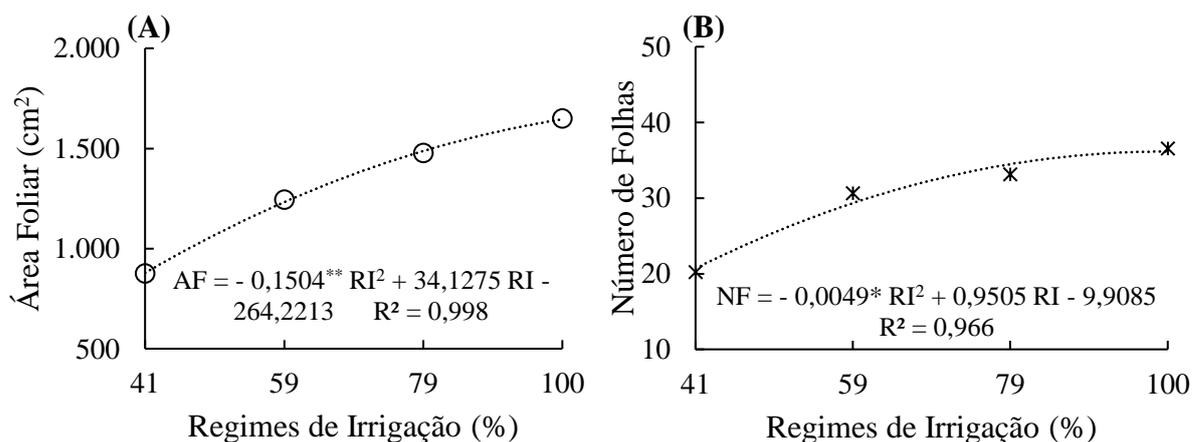


Figura 25. Análise de regressão área foliar [AF (A)] e número de folhas [NF (B)] de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, em função de regimes de irrigação. *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; e **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Aos dados de AF e NF o modelo quadrático apresentou os melhores ajustes, sendo que 99% da variabilidade de AF pôde ser explicada pela variabilidade de RI (Figura 25A), a qual também pôde explicar 96% da variabilidade de NF (Figura 25B). Os resultados indicam que houve incremento de AF com o aumento de RI, entretanto, seguindo a tendência quadrática, foi possível projetar que o ponto máximo estimado estaria próximo a um RI de 113% (Figura 25A). A mesma tendência foi observada para NF, sendo que, conforme o modelo ajustado, o ponto de máximo valor de NF estaria próximo a um RI de 97% (Figura 25B). Vale destacar que essas variáveis apresentaram alta correlação (0,93), o que pode explicar a similaridade de respostas, em função dos mesmos fatores.

Na Tabela 14 estão apresentados os valores médios de H, NF, MFC e MSR, em função da inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* e aplicação de *Trichoderma* spp.

Tabela 14. Valores médios de comprimento da haste principal (H), número de folhas (NF), massa fresca de caule (MFC) e massa seca de sistema radicular (MSR) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, submetidas a tratamentos com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* e *Trichoderma* spp.

Variável	Inoculação	<i>Trichoderma</i> spp.				
		FG	TA	TH	TS	TT
H (cm)	TF	60,5 aA	63,3 aA	54,3 bA	62,5 aA	61,3 aA
	FSP	67,5 aA	57,7 aA	67,0 aA	59,2 aA	59,0 aA
NF	TF	31,4 aAB	35,4 aA	24,2 aB	33,0 aAB	30,4 aAB
	FSP	31,9 aA	25,3 bA	30,4 aA	30,3 aA	30,7 aA
MFC (g)	TF	48,4 aAB	53,1 aA	39,3 aB	48,8 aAB	46,3 aAB
	FSP	47,1 aA	39,0 bA	45,4 aA	44,6 aA	47,7 aA
MSR (g)	TF	4,7 aAB	5,3 aAB	3,4 aB	7,2 aA	5,2 aAB
	FSP	4,9 aA	3,3 bA	4,4 aA	4,7 bA	4,4 aA

H – Comprimento da haste principal; NF – número de folhas; MFC – massa fresca de caule; MSR – massa seca de sistema radicular; FSP – Inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*; TF – testemunha (água destilada); TA – aplicação de *Trichoderma asperellum*; TH – aplicação de *Trichoderma harzianum*; TS – aplicação de *Trichoderma stromaticum*; FG – testemunha (fungicida sistêmico); TT – testemunha (água destilada); *Médias seguidas das mesmas letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na presença do fitopatógeno (FSP), não foram observadas diferenças entre os valores de H, NF, MFC e MSR, sob os tratamentos à base de *Trichoderma* spp. (Tabela 14). Por outro lado, na ausência do fitopatógeno (TF), foram observadas diferenças entre os valores de H, NF, MFC e MSR, pela aplicação do tratamento à base de *Trichoderma* spp. Sob essa condição, os maiores valores de NF (35,4) e MFC (53,1 g) foram observados em plantas que receberam suspensão de *Trichoderma asperellum* (TA), sendo tais valores cerca de 16% e 15%, respectivamente, superiores à testemunha (TT) (Tabela 14). O maior valor de MSR (7,2 g) ocorreu em plantas que receberam suspensão de *Trichoderma stromaticum* (TS). Este valor foi cerca de 38% superior ao observado para TT (Tabela 14). Contrastando com esses resultados, plantas que receberam *Trichoderma harzianum*, apresentaram os menores valores de NF (24,2), MFC (39,3 g) e MSR (3,4 g) dentre os tratamentos testados (Tabela 14).

Com estes resultados, fica evidente a ausência de efeito antagonístico das espécies de *Trichoderma* testadas sobre *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, uma vez que plantas inoculadas com o fitopatógeno não apresentaram médias superiores às testemunhas (FG e TT) (Tabela 14). No entanto, considerando que o processo de inoculação foi bem-sucedido, haja vista a conclusão do postulado de Koch (dados não apresentados), pode-se supor que no momento da coleta dos dados a doença ainda estava em estágio inicial, num ponto em que não ocorrem danos à planta, sobretudo que impactem negativamente sobre NF, MFC e MSR. Assim, caso a situação dessa suposição tenha ocorrido, pode ser uma possível explicação para a ausência do efeito antagonístico por parte das espécies de *Trichoderma* testadas.

Isto, no entanto, não significa dizer que não houve interação entre os microorganismos, mas apenas que, com base nas variáveis analisadas, não houve efeito negativo da interação entre *Fusarium solani* f.sp. *piperis* e o hospedeiro susceptível, as plantas de pimenta do reino, sem nenhuma relação aparente com resistência. Tanto é assim que, na presença do fitopatógeno, a aplicação de *Trichoderma* spp. não apresentou qualquer efeito sobre as variáveis utilizadas, o que somente ocorreu em plantas inoculadas com o fitopatógeno (Tabela 14).

Diante dos resultados, também foi possível observar o efeito promotor de crescimento dos isolados de *Trichoderma asperellum* e *Trichoderma stromaticum* sobre as plantas de pimenta do reino, ocorrendo, por outro lado, efeito inibitório do isolado de *Trichoderma harzianum*. Isto se baseia no fato de que, na ausência do fitopatógeno, plantas submetidas aos dois primeiros isolados apresentaram maiores médias de NF, MFC e MSR, enquanto às submetidas ao último isolado apresentaram as menores médias (Tabela 14).

Plantas não inoculadas com o fitopatógeno e que receberam tratamento à base de *Trichoderma harzianum* foram cerca de 19% menores que as inoculadas, não ocorrendo diferenças significativas entre as médias das outras variáveis (Tabela 14). No entanto, o efeito oposto ocorreu para as variáveis NF, MFC e MSR, quando foi aplicado *Trichoderma asperellum*, assim como para MSR em plantas que receberam *Trichoderma stromaticum*. As maiores medidas foram observadas em plantas não inoculadas com o fitopatógeno, com diferenças variando de 36% (MFC / TA) a 53% (MSR / TR) (Tabela 14).

Na Tabela 15 estão apresentados os valores médios de H, MFF e MFC, em função dos RIs e da aplicação de *Trichoderma* spp..

Tabela 15. Valores médios de comprimento da haste principal (H), massa fresca de folhas (MFF) e massa fresca de caule (MFC) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, inoculadas com *Trichoderma* spp., sob diferentes regimes de irrigação.

Variável	Trat.	Regimes de Irrigação (%)			
		41	59	79	100
H (cm)	FG	46,1 a *	67,1 a	71,8 a	71,1 a
	TA	55,1 a	53,1 a	72,3 a	61,6 a
	TH	49,5 a	54,7 a	64,0 a	73,5 a
	TS	50,0 a	60,4 a	66,9 a	66,2 a
	TT	54,3 a	54,3 a	57,3 a	75,0 a
MFF (g)	FG	24,7 a	44,7 a	54,9 a	55,4 a
	TA	29,3 a	40,7 a	48,0 ab	55,5 a
	TH	25,5 a	37,2 a	48,2 ab	49,9 a
	TS	28,8 a	39,4 a	50,9 a	60,2 a
	TT	34,7 a	41,8 a	37,2 b	58,6 a
MFC (g)	FG	27,3 a	51,5 a	58,3 a	53,9 a
	TA	31,2 a	43,9 a	56,5 ab	52,8 a
	TH	27,8 a	39,4 a	46,0 ab	53,9 a
	TS	31,2 a	41,9 a	52,8 ab	60,9 a
	TT	40,3 a	44,0 a	42,3 b	61,4 a

Trat. – Tratamento; FG – testemunha (fungicida sistêmico); TA – *Trichoderma asperellum*; TH – *Trichoderma harzianum*; TS – *Trichoderma stromaticum*; TT – testemunha (água destilada). *Médias seguidas das mesmas letras minúsculas na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

De uma forma geral, somente ocorreram diferenças entre as médias para as variáveis MFF e MFC, sob RI 79, evidenciando a forte influência dos RIs sobre estas variáveis, em comparação com a aplicação de *Trichoderma* spp (Tabela 15). Ainda assim, foi possível notar que houve influência positiva dos isolados de *Trichoderma* spp. apenas sob RI 79, em comparação com a testemunha TT. Este resultado está de acordo com Harman et al. (2004), ao afirmarem que a capacidade de incremento na produtividade das culturas por *Trichoderma* spp. é majorada sob condições subótimas, neste caso, de umidade do substrato.

Na Figura 27 estão representadas graficamente as análises de regressão para H, MFF e MFC, em função dos RIs e aplicação de *Trichoderma* spp., e na Tabela 16 estão apresentados os respectivos modelos ajustados e seus parâmetros.

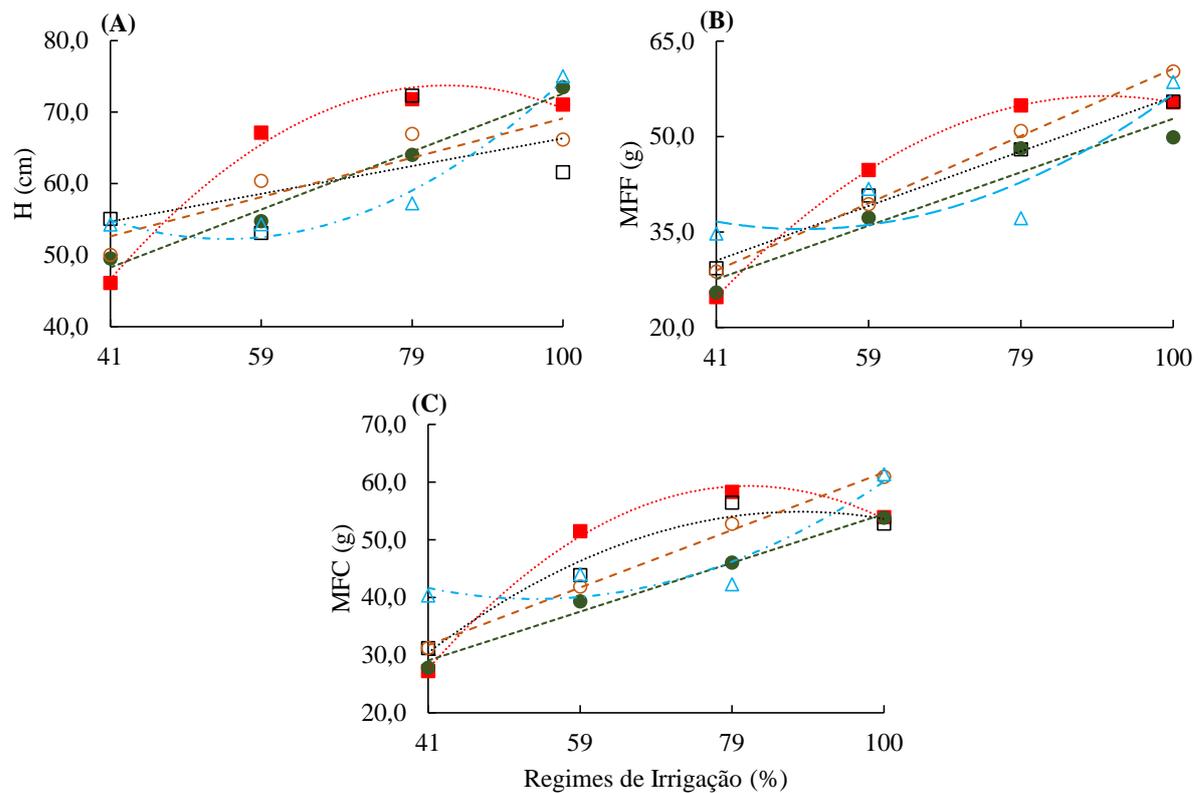


Figura 26. Análise de regressão para comprimento da haste principal [H (A)], massa fresca de folhas [MFF (B)] e massa fresca de caule [MFC (C)] de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, em função de regimes de irrigação (RI) e aplicação de *Trichoderma* spp. (■) Testemunha (fungicida sistêmico); (□) *Trichoderma asperellum*; (●) *Trichoderma harzianum*; (○) *Trichoderma stromaticum*; e (Δ) Testemunha (água destilada).

Tabela 16. Modelos de regressão ajustados aos dados de comprimento da haste principal (H), massa fresca de folhas (MFF) e massa fresca de caule (MFC) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, em função de regimes de irrigação (RI) e aplicação de *Trichoderma* spp. (Continua).

Variável	Trat.	Modelos	R ²
H (cm)	FG	$H_{FG} = -0,0147^{**} RI^2 + 2,4754 RI - 29,8447$	0,978
	TA	$H_{TA} = 0,1946^* RI + 46,9328$	0,328
	TH	$H_{TH} = 0,4125^{**} RI + 31,6601$	0,991
	TS	$H_{TS} = 0,2742^{**} RI + 41,7529$	0,801
	TT	$H_{FG} = 0,0111^* RI^2 - 1,2249 RI + 86,5118$	0,982
MFF (g)	FG	$MFF_{FG} = -0,0137^{**} RI^2 + 2,4397 RI - 52,1393$	0,999
	TA	$MFF_{TA} = 0,4340^{**} RI + 13,1023$	0,979
	TH	$MFF_{TH} = 0,4226^{**} RI + 10,7108$	0,908
	TS	$MFF_{TS} = 0,5362^{**} RI + 7,4087$	0,996
	TT	$MFF_{TT} = 0,0093^* RI^2 - 0,9631 RI + 60,7446$	0,809

Tabela 16. Continuação.

Variável	Trat.	Modelos	R ²
MFC (g)	FG	$MFC_{FG} = -0,0193^{**} RI^2 + 3,1562 RI - 69,0997$	0,991
	TA	$MFC_{TA} = -0,0116^* RI^2 + 2,0214 RI - 32,9652$	0,975
	TH	$MFC_{TH} = 0,4280^{**} RI + 11,9203$	0,977
	TS	$MFC_{TS} = 0,5058^{**} RI + 11,4341$	0,991
	TT	$MFC_{TT} = 0,0098^* RI^2 - 1,0684 RI + 69,0815$	0,891

Trat. – Tratamentos; FG – testemunha (fungicida sistêmico); TA – *Trichoderma asperellum*; TH – *Trichoderma harzianum*; TS – *Trichoderma stromaticum*; TT – testemunha (água destilada); *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; e **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

O aumento em 10% no RI representou acréscimos de 1,9 cm, 4,1 cm e 2,7 cm em H, respectivamente para TA, TH e TS. Já os aumentos de MFF foram de 4,3 g, 4,2 g, e 5,4 g para TA, TH e TS, respectivamente. A elevação de 10% no regime de irrigação proporcionou o acréscimo de MFC em 4,3 g e 5,1 g para TH (Figura 27, Tabela 16).

De acordo com os modelos quadráticos ajustados para H, MFF e MFC, sob FG, os valores máximos para estas variáveis foram referentes a RIs de 84% (H), 89% (MFC) e 82% (FG) da lâmina de irrigação de referência. Sob TT, no entanto, houve decréscimo nos valores destas variáveis até RIs equivalentes a 56% (H), 52% (MFF) e 55% (MFC) da LIR. Sob RIs superiores a estes, ocorreu aumento nos valores de H, MFF e MFC, com o aumento de RI (Figura 27, Tabela 16). Quanto a variável MFC, sob a influência de TA, observou-se aumento dos valores até RI de 87%, ponto de inflexão, a partir do qual, aumentos no RI representaram redução de valores de MFC (Figura 27, Tabela 16).

5.5.2 Análise do Transiente OJIP da Fluorescência da Clorofila a

Foram observadas diferenças significativas pelo teste de Kruskal-Wallis para H ($X^2_{(2)} = 11,293$ e $p < 0,01$) e CLa ($X^2_{(2)} = 6,7056$ e $p = 0,04$), em função das épocas de amostragem (160, 170, 180 DAT). Para CLb, porém, não foram observadas diferenças significativas entre as médias ($X^2_{(2)} = 5,7668$ e $p = 0,06$) (Figura 27).

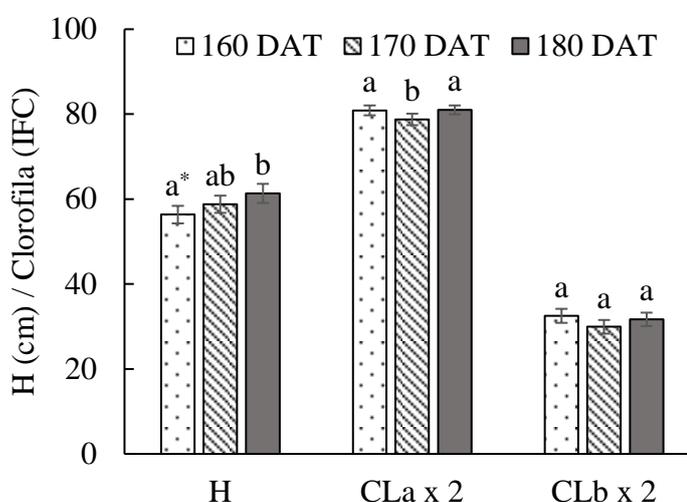


Figura 27. Valores médios e intervalos de confiança ($\alpha = 0,05$) de comprimento da haste principal (H) e índices de clorofila¹ a (CLa) e b (CLb) de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 160, 170 e 180 DAT. *Médias seguidas pelas mesmas letras para cada variável, não

diferem pelo teste de Wilcoxon pareado a 5% de probabilidade; ICF – índice de clorofila Falker; e ¹Valores multiplicados por dois.

Conforme resultado do teste Wilcoxon pareado, medidas de H realizadas aos 180 DAT foram superiores ($p < 0,01$) que as realizadas aos 160 DAT, sendo que ambas foram iguais estatisticamente à realizada aos 170 DAT (Figura 27). Já os menores valores de CLa foram observados aos 170 DAT, sem que houvesse diferenças entre as médias referentes a 160 e 180 DAT (Figura 27).

Na Figura 28 estão representadas graficamente as curvas do transiente OJIP para as três épocas de amostragem, em plantas submetidas a inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* e RIs. Foram observadas curvas típicas de transiente OJIP da fluorescência da CLa (STRASSER; SRIVASTAVA e GOVINDJEE, 1995) para todas as épocas de avaliação, com valores de máxima fluorescência (F_M) ligeiramente mais elevados aos 170 DAT (Figura 28). Tais curvas indicaram que no momento da amostragem as folhas apresentavam-se fotossinteticamente ativas (YUSUF et al., 2010).

Na Figura 29 estão representados os valores relativos do agrupamento ou conectividade energética entre unidades fotossintéticas do FSII (Banda L), calculados em função do tratamento de referência (TR), definido como RI 100 e TF. Aos 160 DAT, plantas submetidas a RI 41 e RI 59, independentemente de inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, apresentaram maior conectividade energética que outras submetidas ao TR (Figura 29A, D). Foi possível observar também que praticamente não houve diferenças entre os tratamentos RI 79 e RI 100 para plantas submetidas a TF (testemunha), tendo em vista que os valores de ΔW_{OK} foram similares, inclusive entre 0,10 e 0,15 ms, quando as maiores diferenças cinéticas ΔW_{OK} são observadas (Figura 29A). Quanto às plantas inoculadas (FSP) e também submetidas a IR 79 e IR 100, notou-se pior agrupamento energético entre unidades do FSII, em comparação com TR (Figura 29A).

Aos 170 DAT plantas irrigadas com RI 79 apresentaram ΔW_{OK} positivo quando submetidas a FSP (Figura 29E) e negativo quando não (TF) (Figura 29B), indicando influência negativa da inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* sobre o aparato fotossintético deste conjunto de plantas. O contrário ocorreu para plantas submetidas a RI 41 (Figura 29B, E).

Praticamente não foram observadas diferenças entre os valores de ΔW_{OK} referentes aos tratamentos RI 100 sob FSP ou TF, aos 180 DAT (Figura 29C, F). Para os demais tratamentos, observou-se maior conectividade energética no FSII (ΔW_{OK} negativos), em comparação com TR (Figura 29C, F).

De uma forma geral, ficou nítida a pior condição fotossintética de plantas submetidas à RIs mais elevados (RI 79 e RI 100), em comparação com as demais, indicando menor probabilidade de agrupamento energético no FSII, levando a um quadro de menor estabilidade do sistema fotossintético destas plantas (TSIMILLI-MICHAEL e STRASSER, 2008). Isto pode ter ocorrido pelo fato de que, embora este conjunto de plantas estivesse recebendo maiores frações de água, a irrigação só era ativada quando a tensão de retenção no substrato atingia 10 kPa. Por outro lado, o conjunto de plantas submetidas a RI 41 e RI 59 recebeu menores frações de água que as demais desde o início do experimento. Com isso, seu crescimento foi regulado, de tal forma que, no final do experimento, quando foram realizadas as análises, estas plantas certamente demandavam menor quantidade de água, em comparação com as demais, porém continuavam recebendo frações de água referentes às plantas mais desenvolvidas. Todavia, pode ser que essa fração tenha passado de fator limitante no início do experimento, para suprimento ótimo no final, fazendo com que as plantas submetidas a RI 79 e RI 100 experimentassem condição hídrica pior que as submetidas a RI 41 e RI 59, suficientemente para isso se refletir nas alterações observadas.

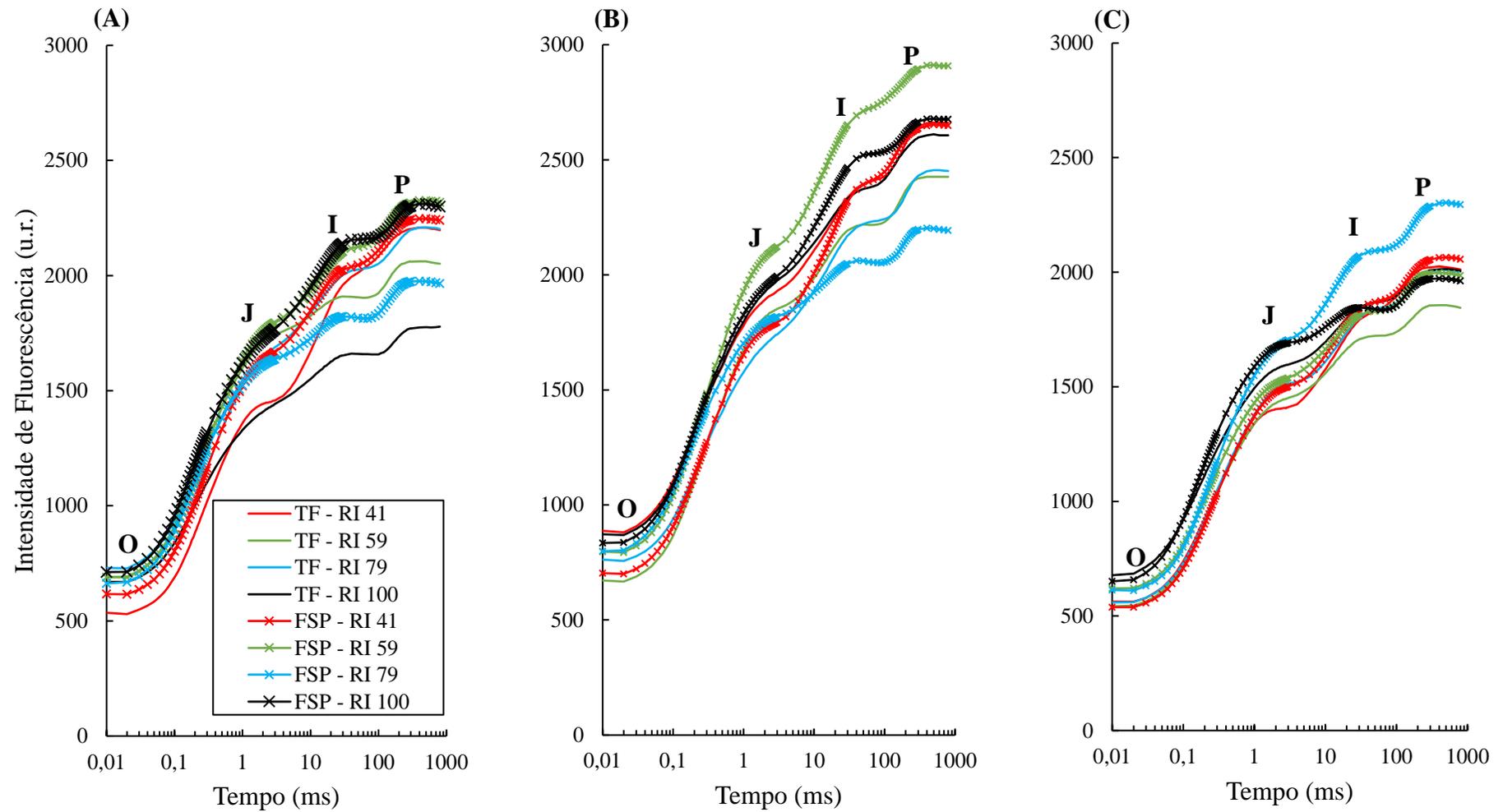


Figura 28. Transiente da fluorescência da clorofila a de folhas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, adaptadas ao escuro, aos 160 (A), 170 (B) e 180 (C) dias após o transplântio, inoculadas com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* e submetidas a diferentes regimes de irrigação (RI). u.r. – Unidade relativa; FSP – inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*; TF – testemunha (sem inoculação); RI 41 – 41% da lâmina de irrigação de referência (LIR); RI 59 – 59% da LIR; RI 79 – 79% da LIR; RI 100 – 100% da LIR.

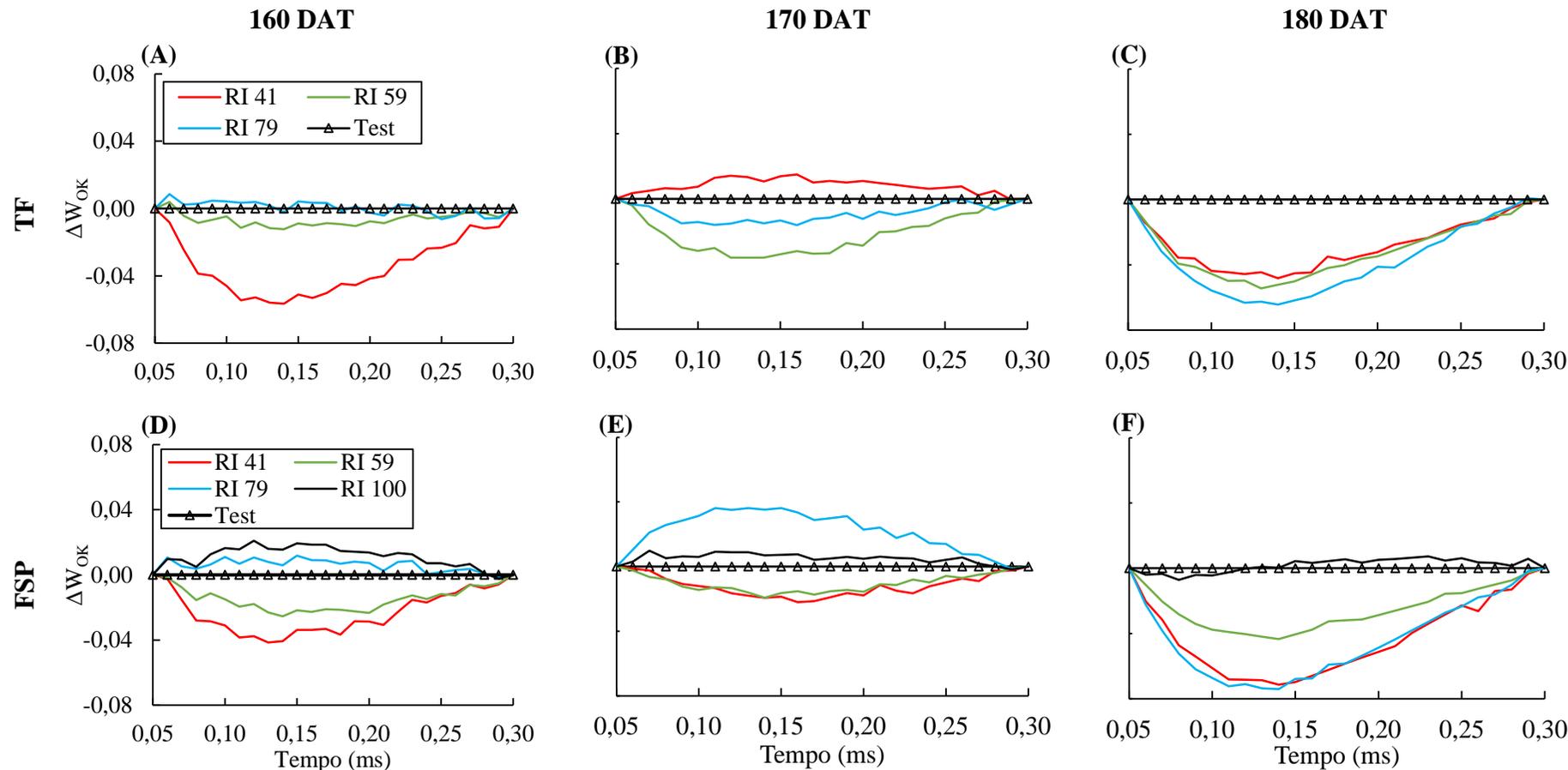


Figura 29. Diferença cinética OJIP da fluorescência da clorofila a (Banda L) de folhas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, adaptadas ao escuro, aos 160 (A e D), 170 (B e E) e 180 DAT (C e F). FSP – Inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*; TF – testemunha (sem inoculação); RI 41 – 41% da lâmina de irrigação de referência (LIR); RI 59 – 59% da LIR; RI 79 – 79% da LIR; RI 100 – 100% da LIR; e ΔW_{OK} - Diferenças de cinética da fluorescência da clorofila a normalizada entre as fases “O” (50 μ s) e “K” (300 μ s) (Banda L).

Na Figura 30 estão apresentadas as diferenças cinéticas ΔW_{OJ} (Banda K). Foi possível notar que as maiores diferenças ocorreram próximas ao tempo 0,20 ms para todos os tratamentos. Aos 160 DAT, dentre as plantas não inoculadas com o fitopatógeno (TF), aquelas submetidas a RIs menores que 100% apresentaram ΔW_{OJ} negativos, em comparação com TR (Figura 30A). Quando submetidas a FSP, ficou evidente a formação de dois grupos de tratamentos, os quais apresentaram valores de ΔW_{OJ} negativos (RI 41 e RI 59) e positivos (RI 79 e RI 100) (Figura 30D).

Aos 170 DAT, plantas não inoculadas (TF) e submetidas a RI 59 e RI 79 continuaram apresentando melhor estabilidade do complexo de evolução do oxigênio que as plantas testemunha (Test), entretanto as submetidas a RI 41 apresentaram ΔW_{OJ} negativos, próximo ao pico (Figura 30B). Quanto às plantas inoculadas (FSP), foi mantido o mesmo padrão observado aos 160 DAT, entretanto, plantas sob RI 79 ampliaram a diferença positiva de W_{OJ} , em comparação com a testemunha, próximo ao pico (Figura 30E).

Por fim, aos 180 DAT ocorreram as maiores diferenças de W_{OJ} em comparação com a testemunha. Neste caso, para plantas não inoculadas todos os tratamentos apresentaram valores de ΔW_{OJ} negativos, indicando maior estabilidade fotossintética que a testemunha. Dentre estes, a sequência de negatividade foi RI 79 > RI 59 > RI 41 (Figura 30C). No conjunto de plantas inoculadas ocorreu algo semelhante, porém, os tratamentos RI 41 e RI 79 foram os que apresentaram ΔW_{OJ} mais negativos, apresentando valores similares próximo ao pico. Plantas sob RI 59 apresentaram ΔW_{OJ} menos negativos que as anteriores, enquanto as submetidas a RI 100, apresentaram valores positivos, sendo as únicas a apresentarem estabilidade fotossintética inferior à testemunha (Figura 30F).

De maneira geral, sistemas fotossintéticos mais estáveis foram observados em plantas sob RI 41, tendo em vista que ocorreram maiores amplitudes de Banda L, contrastando com RI 100, que apresentaram conectividade de unidades do FSII menor, em comparação com os demais tratamentos (YUSUF et al., 2010). Quanto à Banda K, que, quando positiva, reflete certa deficiência na doação de elétrons da água para o FSII, levando a um declínio das taxas de processos fotoquímicos na planta (Strasser, 1975), foi mais positiva em plantas inoculadas (FSP) sob RI 100, principalmente. Em contraste, novamente, para a maioria das situações, plantas submetidas a RI 41 apresentaram Banda L com maior amplitude e negativas.

Esses resultados podem estar relacionados ao fato de que, por terem sido hidratadas de forma mais adequada desde o início, plantas submetidas a RI 100 apresentaram crescimento superior às demais. Com isso, plantas submetidas a RI 41 e RI 59, principalmente, chegaram ao fim do experimento demandando menos água proporcionalmente, em comparação com plantas sob RI 79 e RI 100. Entretanto, o fornecimento de água continuou sendo referente a frações das demandas hídricas destas últimas, o que provavelmente não só atendia plenamente as demandas de plantas sob RI 41 e RI 59, como também permanecia retida nos substratos.

Este tipo de resposta também foi observado por Valença et al. (2018), que utilizaram um dispositivo ASI similar ao usado no presente trabalho, em um cultivo orgânico de alface em recipientes, empregando o mesmo tipo de manejo da irrigação, ou seja, aplicação de regimes de irrigação baseados na demanda de um conjunto de plantas de referência.

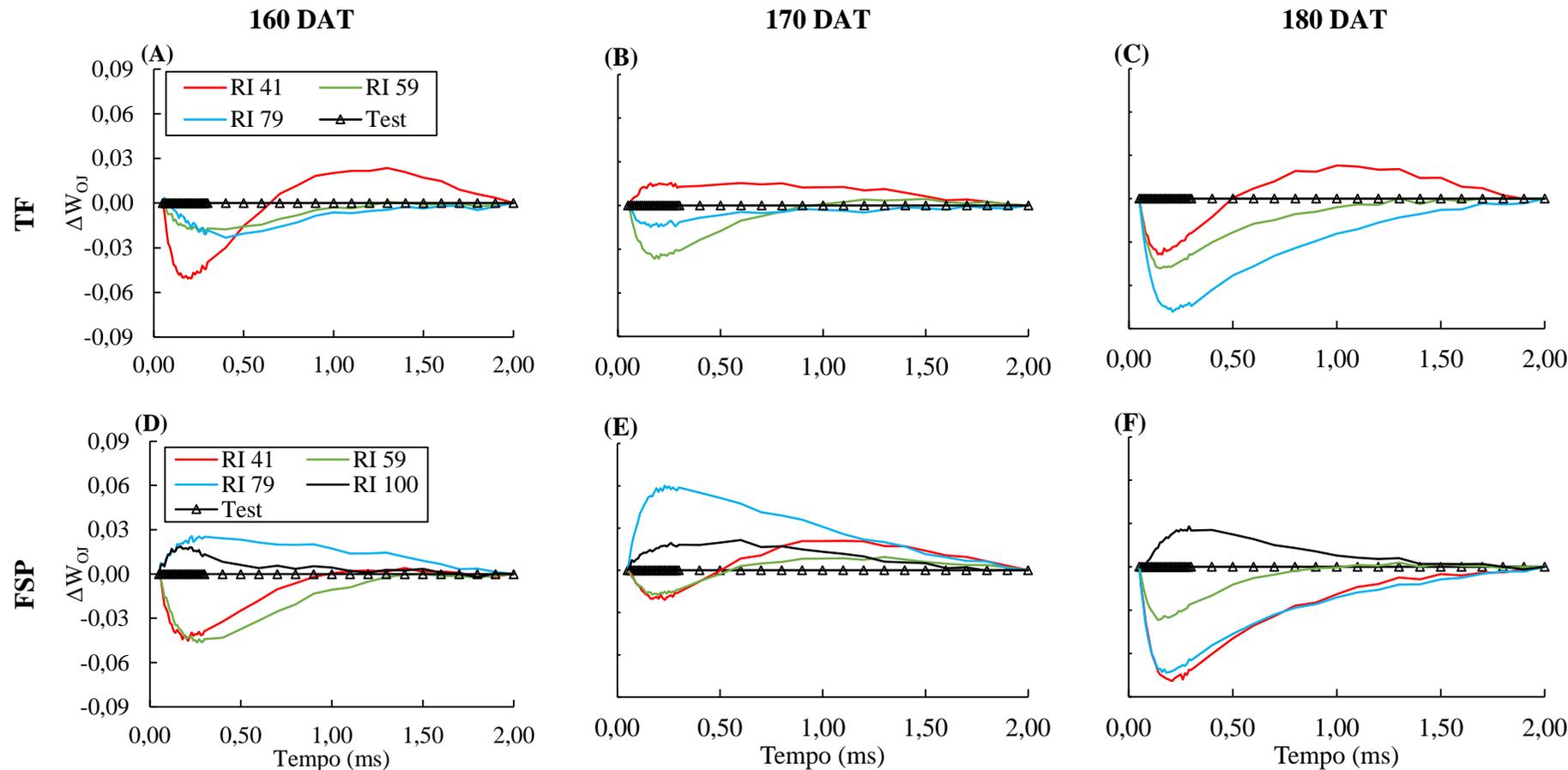


Figura 30. Diferença cinética OJIP da fluorescência da clorofila a (Banda K) de folhas de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, adaptadas ao escuro, aos 160 (A e B), 170 (C e D) e 180 DAT (E e F). FSP – Inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*; TF – testemunha (sem inoculação); RI 41 – 41% da lâmina de irrigação de referência (LIR); RI 59 – 59% da LIR; RI 79 – 79% da LIR; RI 100 – 100% da LIR; e ΔW_{OJ} - Diferenças de cinética da fluorescência da clorofila a normalizada entre as fases O (50 μ s) e J (2 ms).

Nas Figura 31, 32 e 33 estão representados os parâmetros biofísicos relacionados ao fluxo de energia, produtividade, eficiência e índices de performance fotossintéticos, obtidos a partir dos parâmetros básicos do teste JIP.

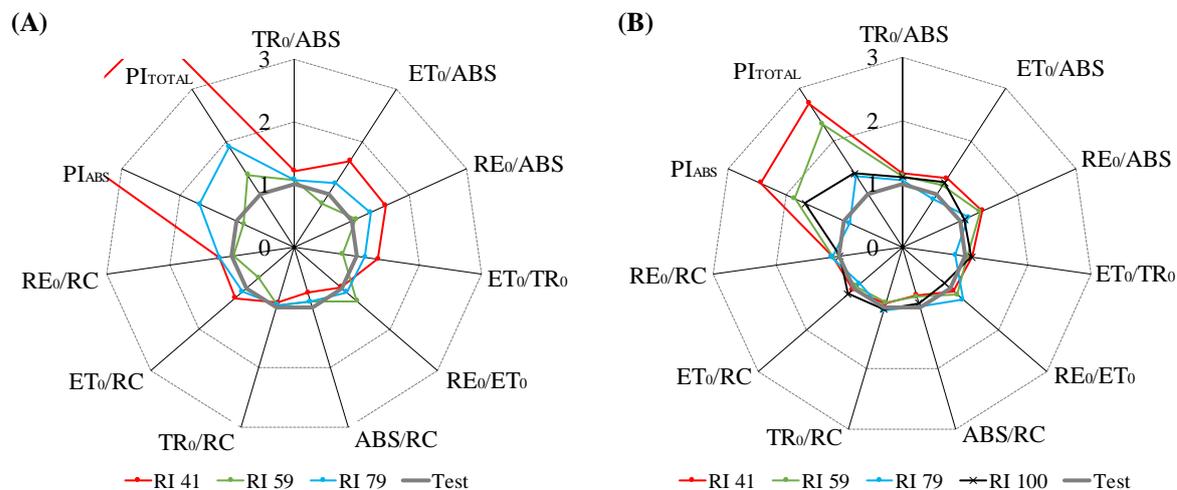


Figura 31. Parâmetros biofísicos de fluxo de energia, produtividade, eficiência e índices de performance, derivados de parâmetros básicos do teste JIP, de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 160 DAT, inoculadas com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (A) e não inoculadas (B), sob diferentes regimes de irrigação (RI). RI 41 – 41% da lâmina de irrigação de referência (LIR); RI 59 – 59% da LIR; RI 79 – 79% da LIR; RI 100 – 100% da LIR; Test – testemunha (RI 100, sem inoculação); ABS/RC – fluxo de absorção (excitação de moléculas de CLa na antena FSII) por centro de reação (RC); TR₀/RC - fluxo de energia capturado (levando à redução de Q_A), por RC; ET₀/RC - fluxo de transporte de elétrons (além da Q_A⁻), por RC; RE₀/RC - fluxo de redutores e aceptores finais de elétrons no lado acceptor fotossistema I (FSI), por RC; TR₀/ABS ≡ φ_{Po} - rendimento quântico máximo para a fotoquímica primária; ET₀/ABS ≡ φ_{Eo} - rendimento quântico do transporte de elétrons (ET); RE₀/ABS ≡ φ_{Ro} - rendimento quântico de redução do acceptor final de elétrons no lado acceptor FSI; ET₀/TR₀ ≡ Ψ_{EO} - eficiência/probabilidade que um elétron se move além de Q_A⁻; RE₀/ET₀ ≡ δ_{Ro} - eficiência com a qual um elétron do intersistema carreador de elétrons é transferido para reduzir os receptores finais de elétrons finais no lado acceptor FSI; PI_{ABS} - índice de performance para conservação de energia a partir de fótons absorvidos pelo FSII, até a redução do intersistema acceptor de elétrons; e PI_{Total} = índice de performance para conservação de energia a partir de fótons absorvidos pelo FSII, até a redução dos aceptores finais de elétrons FSI.

Aos 160 DAT, as maiores produtividades (TR₀/ABS, ET₀/ABS e RE₀/ABS) foram observadas em plantas sob RI 41, independente da inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (Figura 31A, B). Nestes casos, a presença do fitopatógeno ocasionou redução das produtividades, principalmente a relacionada ao transporte de elétrons até o intersistema acceptor (ET₀/ABS), na qual a redução foi de aproximadamente 20% (Figura 31A, B). Em comparação com a testemunha (Test), apenas RI 59 sem inoculação (Figura 31A) e RI 79 com inoculação (Figura 31B) apresentaram produtividades fotossintéticas inferiores.

A eficiência de motilidade de um elétron para além de Q_A⁻ (ET₀/TR₀) foi superior em plantas sob RI 41 não inoculadas, seguida de plantas também não inoculadas, submetidas a RI 79. Os valores foram cerca de 34% e 13% maiores, respectivamente que Test (Figura 31A, B). Valores inferiores ao observado para Test ocorreram em plantas sob RI 59, sem inoculação, e RI 79 com inoculação (Figura 31A, B). Quanto a eficiência de transporte de elétrons RE₀/ET₀, mais relacionada ao FSI, apenas plantas sob RI 41 não inoculadas e RI 100 inoculadas apresentaram valores inferiores à Test, sendo o maior valor referente ao tratamento RI 59 sem inoculação, o qual foi 31% superior ao observado para Test (Figura 31A).

Em plantas não inoculadas, e sob RI 41, ocorreram os menores valores de fluxo de absorção (ABS/RC) e de energia capturada por centro de reação (TR₀/RC), e os maiores fluxos referentes ao transporte de elétrons além da Q_A⁻ (ET₀/RC) e no FSI (RE₀/RC) (Figura 31A).

Os índices de performance PI_{ABS} e PI_{Total} foram os parâmetros que mais demonstraram diferenças entre os tratamentos. Para plantas não inoculadas sob RI 41, o valor de PI_{ABS} foi cerca de 4,3 vezes superior ao observado para Test. O menor valor, por outro lado, correspondeu a 80% do valor observado para Test, e foi referente a RI 59 (Figura 31A). Em plantas inoculadas, RI 41 ainda proporcionou maior índice de performance até a redução dos intersistema aceptores de elétrons (PI_{ABS}), no entanto, esse valor foi 2,4 vezes superior ao observado para Test (Figura 31A). O índice de performance PI_{Total} apresentou a mesma tendência de PI_{ABS}, sendo que o tratamento Test apresentou o menor índice entre todos os tratamentos, enquanto RI 41 sem inoculação apresentou o maior valor.

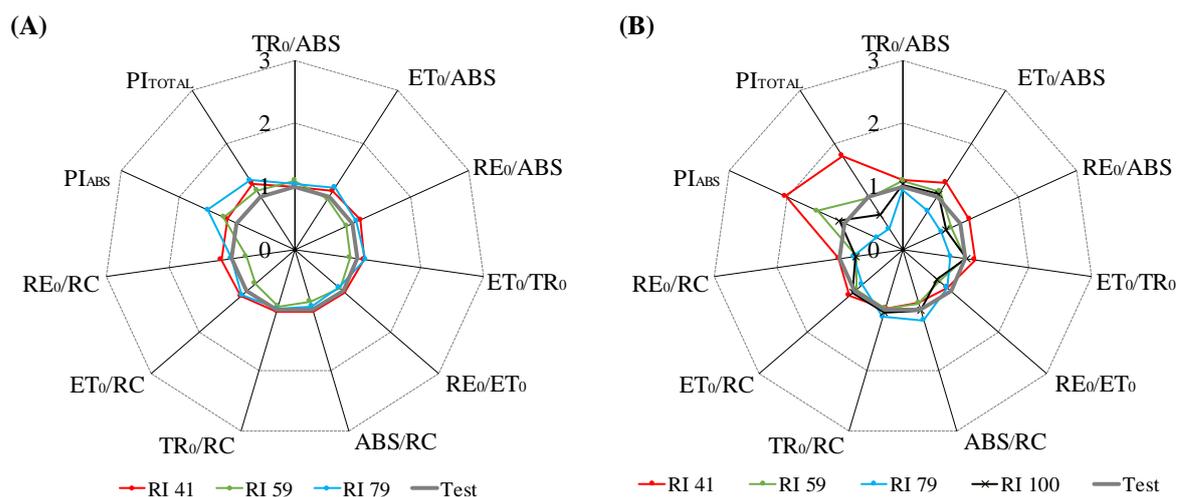


Figura 32. Parâmetros biofísicos de fluxo de energia, produtividade, eficiência e índices de performance, derivados de parâmetros básicos do teste JIP, de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 170 DAT, inoculadas com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (A) e não inoculadas (B), sob diferentes regimes de irrigação (RI). RI 41 – 41% da lâmina de irrigação de referência (LIR); RI 59 – 59% da LIR; RI 79 – 79% da LIR; RI 100 – 100% da LIR; Test – testemunha (RI 100, sem inoculação); ABS/RC – fluxo de absorção (excitação de moléculas de CLa na antena FSII) por centro de reação (RC); TR₀/RC - fluxo de energia capturado (levando à redução de Q_A⁻), por RC; ET₀/RC - fluxo de transporte de elétrons (além da Q_A⁻), por RC; RE₀/RC - fluxo de redutores e aceptores finais de elétrons no lado aceptor fotossistema I (FSI), por RC; TR₀/ABS ≡ φ_{Po} - rendimento quântico máximo para a fotoquímica primária; ET₀/ABS ≡ φ_{Eo} - rendimento quântico do transporte de elétrons (ET); RE₀/ABS ≡ φ_{Ro} - rendimento quântico de redução do aceptor final de elétrons no lado aceptor FSI; ET₀/TR₀ ≡ Ψ_{EO} - eficiência/probabilidade que um elétron se move além de Q_A⁻; RE₀/ET₀ ≡ δ_{Ro} - eficiência com a qual um elétron do intersistema carreador de elétrons é transferido para reduzir os receptores finais de elétrons finais no lado aceptor FSI; PI_{ABS} - índice de performance para conservação de energia a partir de fótons absorvidos pelo FSII, até a redução do intersistema aceptor de elétrons; e PI_{Total} = índice de performance para conservação de energia a partir de fótons absorvidos pelo FSII, até a redução dos aceptores finais de elétrons FSI.

De maneira geral, dentre as datas de amostragem, aos 170 DAT foram observadas as menores diferenças entre os tratamentos, principalmente para plantas não inoculadas (Figura 32). Destaca-se apenas que plantas sob RI 59 não inoculadas apresentaram produtividades ET₀/ABS e RE₀/ABS inferiores a Test, sendo os demais valores dos demais tratamentos superiores, porém em menor magnitude (Figura 32A). Plantas inoculadas sob RI 41 apresentaram maiores produtividades que as demais, enquanto plantas sob RI 79 apresentaram os menores valores dos três tipos de produtividade (Figura 32A).

As eficiências de movimentação de elétrons ET_0/TR_0 e RE_0/ET_0 também variaram menos em plantas inoculadas, em comparação com inoculadas. Dentre as primeiras, foi observada maior eficiência ET_0/TR_0 em plantas sob RI 79 e menor sob RI 59 (Figura 32A). Em relação à eficiência RE_0/ET_0 o maior valor ocorreu sob RI 41, o qual foi apenas 4% superior ao observado para Test (Figura 32A). Em plantas inoculadas, apenas as submetidas a RI 41 e RI 100 superaram Test, em relação aos valores de ET_0/TR_0 , enquanto para RE_0/ET_0 todos os tratamentos foram inferiores a Test (Figura 32B).

Em relação aos valores de ABS/RC , dentre todos os tratamentos, apenas RI 41 (não inoculado) e RI 79 e RI 100 (inoculado) apresentaram maior fluxo de absorção por centro de reação que a testemunha, mesmo assim, o maior valor observado (RI 79, inoculado) foi 1,17 vezes superior a este (Figura 32A, B). O mesmo ocorreu para o fluxo de energia capturada por centro de reação (TR_0/RC), sendo que o maior valor observado foi 1,11 vezes superior ao observado para a testemunha (Figura 31A, B).

A exemplo do que ocorreu aos 160 DAT, os índices de performance PI_{ABS} e PI_{Total} revelaram as maiores diferenças entre os tratamentos testados aos 170 DAT. Entretanto, a magnitude das diferenças foi menor, em comparação, sobretudo para plantas não inoculadas (Figura 31A). Para PI_{ABS} , apenas plantas inoculadas e sob RI 79 apresentaram índice de performance inferior à testemunha, sendo este valor cerca de 55% inferior a este (Figura 32A). Dentre as plantas não inoculadas, as submetidas ao RI 79 apresentaram performance cerca de 1,5 superior ao observado nas testemunhas. Dentre as inoculadas, ocorreu a seguinte ordem de tratamentos, em termos de magnitude de PI_{ABS} : RI 41 > RI 59 > RI 100 > RI 79 (Figura 32A).

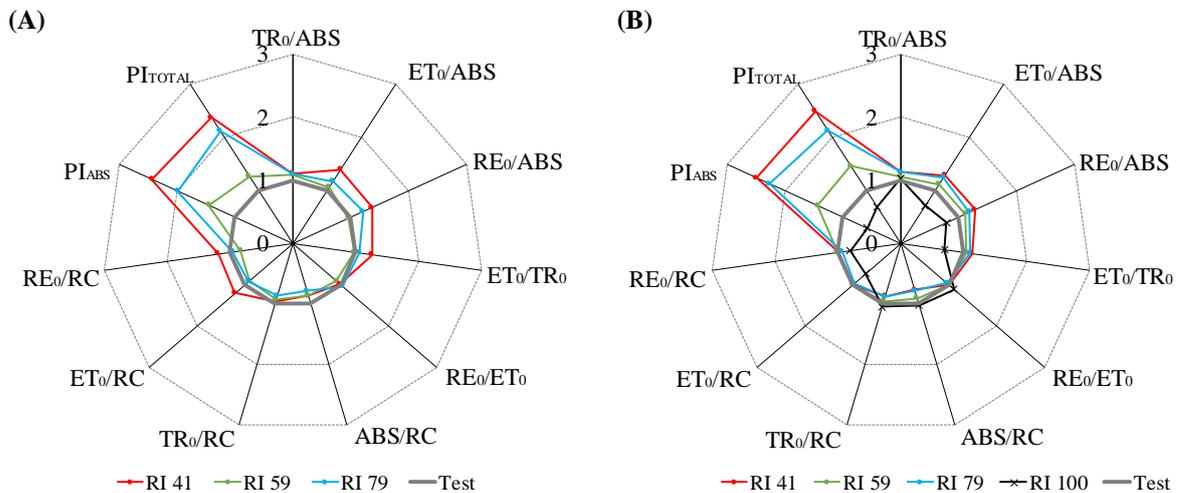


Figura 33. Parâmetros biofísicos de fluxo de energia, produtividade, eficiência e índices de performance, derivados de parâmetros básicos do teste JIP, de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, aos 180 DAT, inoculadas com *Fusarium solani* f.sp. *piperis* (A) e não inoculadas (B), sob diferentes regimes de irrigação (RI). RI 41 – 41% da lâmina de irrigação de referência (LIR); RI 59 – 59% da LIR; RI 79 – 79% da LIR; RI 100 – 100% da LIR; Test – testemunha (RI 100, sem inoculação); ABS/RC – fluxo de absorção (excitação de moléculas de CLA na antena FSII) por centro de reação (RC); TR_0/RC – fluxo de energia capturado (levando à redução de Q_A), por RC; ET_0/RC – fluxo de transporte de elétrons (além da Q_A), por RC; RE_0/RC – fluxo de redutores e aceptores finais de elétrons no lado acceptor fotossistema I (FSI), por RC; $TR_0/ABS \equiv \phi_{P_0}$ – rendimento quântico máximo para a fotoquímica primária; $ET_0/ABS \equiv \phi_{E_0}$ – rendimento quântico do transporte de elétrons (ET); $RE_0/ABS \equiv \phi_{R_0}$ – rendimento quântico de redução do acceptor final de elétrons no lado acceptor FSI; $ET_0/TR_0 \equiv \Psi_{E_0}$ – eficiência/probabilidade que um elétron se move além de Q_A ; $RE_0/ET_0 \equiv \delta_{R_0}$ – eficiência com a qual um elétron do intersistema carreador de elétrons é transferido para reduzir os receptores finais de elétrons finais no lado acceptor FSI; PI_{ABS} – índice de performance para conservação de energia a partir de fótons absorvidos pelo FSII, até a redução do intersistema acceptor de elétrons; e PI_{Total} = índice de performance para conservação de energia a partir de fótons absorvidos pelo FSII, até a redução dos aceptores finais de elétrons FSI.

Aos 180 DAT foi possível observar menores produtividades (TR_0/ABS , ET_0/ABS e RE_0/ABS) em plantas testemunha para todos os tratamentos, com exceção de RI 100 (inoculada), que apresentou menores valores para ET_0/ABS e RE_0/ABS , correspondentes a 71% e 79%, respectivamente, dos valores da testemunha. Independente de inoculação, plantas sob RI 41 e RI 79 apresentaram as maiores taxas de fluxos de energia (Figura 33A, B).

As maiores eficiências de transporte de elétrons (ET_0/TR_0 e RE_0/ET_0) em plantas não inoculadas ocorreram em plantas sob RI 79, as quais foram 6% e 4% superior ao observado para as testemunhas. Para ET_0/TR_0 apenas as plantas submetidas a RI 59 (sem inoculação) e RI 100 (com inoculação) apresentaram eficiência inferior à testemunha (Figura 33A, B). Para RE_0/ET_0 , no entanto, apenas RI 79 (sem inoculação) e RI 59 e RI 100 (com inoculação) apresentaram eficiência superior ao observado para as testemunhas (Figura 33A, B). Fica evidente, com estes resultados, que o tratamento RI 41 foi mais afetado negativamente no que se referiu à eficiência no transporte de elétrons até o FSI (RE_0/ET_0), do que até além de Q_A^- (ET_0/TR_0).

Os fluxos de absorção (ABS/RC) e de energia capturada (TR_0/RC) por centro de reação foram afetados negativamente pelos menores RIs, tendo em vista que os maiores valores foram observados em plantas sob RI 100, independente de inoculação (Figura 33A, B). Por outro lado, os fluxos de transporte de elétrons além da Q_A^- (ET_0/RC) e de redutores e aceptores finais de elétrons no FSI (RE_0/RC) por centro de reação parecem ter sido afetados pelos RIs e inoculação, pois os maiores valores destes parâmetros foram observados em RI 41, para plantas não inoculadas, e em RI 59, para plantas inoculadas, sendo que os menores valores, dentre todos os tratamentos, ocorreram em plantas inoculadas sob RI 100 (Figura 33A, B).

Os menores valores dos índices de performance PI_{ABS} e PI_{Total} dentre todos os tratamentos, ocorreram em plantas inoculadas, submetidas a RI 100. Estes valores corresponderam a 58% (PI_{ABS}) e 69% (PI_{Total}) dos índices observados para plantas testemunha (Figura 33A, B). Tanto para plantas inoculadas, quanto não inoculadas, a sequência decrescente de índices de performance total ou parcial foi: RI 41 > RI 79 > RI 59 > RI 100. As magnitudes de diferenças para a testemunha, entre plantas inoculadas e não inoculadas foram semelhantes, para ambos os índices (Figura 33A, B).

De maneira geral, foi possível notar tendência de melhoria da eficiência fotossintética das plantas, em função da redução dos regimes de irrigação e da não inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*. Quanto aos regimes de irrigação, é provável que tenha ocorrido alteração da disponibilidade hídrica ao longo do experimento, em função do crescimento desuniforme e já esperado de plantas pertencentes a regimes de irrigação diferentes.

Quanto ao resultado da inoculação com *Fusarium solani* f.sp. *piperis*, embora não tenham sido observados sintomas externos da doença causada por este fungo durante o período de observações, sabe-se que este gênero possui mecanismos de ação variados, muitos dos quais ainda desconhecidos (SUMMERELL e LESLIE, 2011). No presente estudo, no entanto, pode ter ocorrido fenômeno parecido com o observado por Pshibytko; Zenevich e Kabashnikova (2006), os quais verificaram alterações deletérias no FSII de folhas de plantas de tomate, causadas pela infecção com *Fusarium oxysporum*, mesmo tendo sido observados sintomas externos.

No presente estudo ficou claro que os maiores regimes de irrigação proporcionaram redução da vitalidade das plantas ao longo do tempo (TSIMILLI e STRASSER, 2008), o que pode ter sido um facilitador para o processo de infecção por Fusariose, uma vez que eventuais mecanismos de defesa contra o ataque de fitopatógenos pode ter sido afetado negativamente por esta condição.

5.6 CONCLUSÕES

O aumento nos regimes de irrigação proporciona elevação de comprimento da haste principal e acúmulo de matéria seca em plantas jovens de pimenta do reino, cv. Bragantina.

O tratamento de substratos com produtos comerciais à base de *Trichoderma asperellum* e *Trichoderma stromaticum* favorece o crescimento de plantas jovens de pimenta do reino, cv. Bragantina, o que é negativamente afetado pelo tratamento com *Trichoderma harzianum*.

A eficiência fotossintética de plantas jovens de pimenta do reino, cv. Bragantina, é negativamente afetada por infecção de *Fusarium solani* f.sp. *piperis* em estágio inicial, e por estresse hídrico leve.

6 CONCLUSÕES GERAIS

A capacidade de retenção de água a 10 hPa de substratos formulados com pó de rocha granítica, biossólido, fibra de coco triturada e/ou vermicomposto pode ser reduzida em até 70%, em comparação com substrato comercial à base de musgo esfagno e vermiculita.

O substrato composto por 75% de biossólido e 25% de pó de rocha granítica (v/v), apresenta elevados teores biodisponíveis de P, Ca, Fe, Zn e Cu.

O substrato composto por biossólido e fibra de coco triturada (3:1, v/v), apresenta restrições químicas, principalmente pH baixo, as quais, podem comprometer seu uso para a produção de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina.

A produção de mudas de pimenta do reino, cv. Bragantina, com alturas iguais ou superiores a 20 cm e seis ou mais folhas, é possível com o uso de substrato composto por biossólido, fibra de coco tritura e pó de rocha granítica (2:1:1, v/v), desde que o suprimento hídrico não seja inferior a 85% da necessidade hídrica das plantas.

Restrição de até 15% da necessidade hídrica de plantas de pimenta do reino, cv. Bragantina, não representam impactos negativos sobre a eficiência de uso da água.

O tratamento de substratos com produtos comerciais à base de *Trichoderma asperellum* e *Trichoderma stromaticum* favorece o crescimento de plantas jovens de pimenta do reino, cv. Bragantina, enquanto o tratamento com *Trichoderma harzianum* afeta negativamente esse crescimento.

A eficiência fotossintética de plantas jovens de pimenta do reino, cv. Bragantina, é negativamente afetada por infecção de *Fusarium solani* f.sp. *piperis* em estágio inicial, e por estresse hídrico leve.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAD, M.; FORNES, F.; CARRIÓN, C.; NOGUERA, V.; NOGUERA, P.; MAQUIEIRA, A.; PUCHADES, R. Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. **HortScience**, v. 40, n. 7, p. 2138–2144, 2005.

ABAD, M.; NOGUERA, P.; PUCHADES, R.; MAQUIEIRA, A.; NOGUERA, V. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerized ornamental plants. **Bioresource Technology**, v. 82, n. 1, p. 241–245, 2002.

ABIROCHAS. **Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais**. Disponível em: <https://abirochas.com.br/panorama-setorial/>. Acesso em 17 dez. 2019.

ABREU, A. H. M.; LELES, P. S. D. S.; DE MELO, L. A.; DE OLIVEIRA, R. R.; FERREIRA, D. H. A. A. Caracterização e potencial de substratos formulados com biossólido na produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* raddi. e *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1179–1190, 2017a.

ABREU, A. H. M.; MARZOLA, L. B.; MELO, L. A. DE; LELES, P. S. DOS S.; ABEL, E. L. S.; ALONSO, J. M. Urban solid waste in the production of *Lafoensia pacari* seedlings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 83–87, fev. 2017b.

ALBUQUERQUE, F. C. Podridão das raízes e do pé da pimenta-do-reino. **Circular do Instituto Agrônomo do Norte**, n. 5, 45p., 1961.

ALBUQUERQUE, F. C.; FERRAZ, S. Características morfológicas e fisiologias de *Nectria haematococca* f. sp. *piperis* e sua patogenicidade à pimenta-do-reino. (*Piper nigrum* L.). **Experientiae**, v. 22, n. 6, p. 133–151, 1976.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. **Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems**. 2 ed. New York: Food Products Press. 2004.

BARRAL SILVA, M. T.; SILVA HERMO, B.; GARCÍA-RODEJA, E.; VÁZQUEZ FREIRE, N. Reutilization of granite powder as an amendment and fertilizer for acid soils. **Chemosphere**, v. 61, n. 7, p. 993–1002, 2005.

BARROS, V. R.; SOUZA, A. P.; CARVALHO, D. F.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 2, p. 198–203, 2009.

BARTLETT, M. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences**, v. 160, n. 901, p. 268–282, 1937.

BAURIEGEL, E.; HERPPICH, W. Hyperspectral and Chlorophyll fluorescence imaging for early detection of plant diseases, with special reference to *Fusarium* spec. infections on wheat. **Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 32–57, 2014.

BENCHIMOL, R. L.; CHU, E. Y.; MUTO, R. Y.; DIAS-FILHO, M. B. Controle da fusariose em plantas de pimenta-do-reino com bactérias endofíticas: Sobrevivência e respostas morfofisiológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1343–1348, 2000.

BENCHIMOL, R. L.; SUTTON, J. C.; BASTOS, C. N.; SILVA, C. M.; DIAS-FILHO, M. B. By-products of *Piper aduncum* in the control of fusariosis in black pepper plant. **Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 3, p. 303–308, 2017.

BENCHIMOL, R. L.; SUTTON, J. C.; DIAS-FILHO, M. B. Potencialidade da Casca de Caranguejo na Redução da Incidência de Fusariose e na Promoção do Crescimento de Mudanças de Pimenteira-do-reino. **Fitopatologia Brasileira**, v. 31, n. 2, p. 1–5, 2006.

BEZERRA, A. C. M.; VALENÇA, D. DA C.; CARVALHO, D. F. DE; PINHO, C. F. DE; REINERT, F.; GOMES, D. P.; GABETTO, F. P.; AZEVEDO, R. A.; MASSERONI, D.; MEDICI, L. O. Automation of lettuce seedlings irrigation with sensors deployed in the substrate or at the atmosphere. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 2, p. 179–189, 2019.

BHUYAN, M. H. M. B.; RAHMAN, S. M. L.; SARKER, J. C. Explicating proper multiplication method for black pepper propagation in Bangladesh. **Advance in Agriculture and Biology**, v. 4, n. 2, p. 75–78, 2015.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An Analysis of Transformations. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v. 26, n. 2, p. 211–243, 1964.

BRASIL. Ministério da Economia, Indústria, Comércio Exterior e Serviços. **Comex Stat**. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em 20 nov. 2019.

BUNT, A. C. Some physical and chemical characteristics of loamless pot-plant substrates and their relation to plant growth. **Plant and Soil**, v. 38, p. 1954–1965, 1973.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. 1. ed. Viçosa/MG: Ed. UFV, 2012.

CASTRO, A. L. F. G.; SILVA, O. R.; SCALIZE, P. S. Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. **Multi-Science Journal**, v. 1, n. 2, p. 66–73, 2015.

CHAUDHARY, D. R.; BHANDARI, S. C.; SHUKLA, L. M. Role of vermicompost in sustainable agriculture - A Review. **Agricultural Reviews**, v. 25, n. 1, p. 29–39, 2004.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução N° 375, de 29 de agosto de 2006**. Define os critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em 20 nov. 2019.

CONNOLLY, E. L.; GUERINOT, M. L. **Iron stress in plants**. *Genome Biology*, v. 3, n. 8. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/gb-2002-3-8-reviews1024>. Acesso em 27 jan. 2020.

CORONEOS, C.; HINSINGER, P.; GILKES, R. J. Granite powder as a source of potassium

for plants: a glasshouse bioassay comparing two pasture species. **Fertilizer Research**, v. 45, n. 2, p. 143–152, 1995.

DĄBROWSKI, P.; BACZEWSKA-DĄBROWSKA, A. H.; KALAJI, H. M.; GOLTSEV, V.; PAUNOV, M.; RAPACZ, M.; WÓJCIK-JAGŁA, M.; PAWLUŚKIEWICZ, B.; BAŁA, W.; BRESTIC, M. Exploration of Chlorophyll a fluorescence and plant gas exchange parameters as indicators of drought tolerance in perennial ryegrass. **Sensors**, v. 19, n. 12, p. 1 - 24, 2019.

DE BOODT, M.; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in horticulture. **Acta Horticulturae**, v. 26, p. 37–44, 1972.

CASTRO, G. L. S.; LEMOS, O. F.; TREMACOLDI, C. R.; MORAES, F. K. C.; SANTOS, L. R. R.; PINHEIRO, H. A. Susceptibility of in vitro black pepper plant to the filtrate from a *Fusarium solani* f.sp. *piperis* culture. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 127, n. 1, p. 263–268, 30 out. 2016.

ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca. **Plano Estratégico de Desenvolvimento da Agricultura: novo PEDEAG 2007-2025**. Disponível em: http://es-acao.org.br/_midias/pdf/NovoPEDEAG.PDF. Acesso em 20 dez. 2018.

FAO. Faostat. **Crop statistics**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em 28 nov. 2019.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAO Term Portal**. Disponível em: <http://www.fao.org/faoterm/en/>. Acesso em 4 fev. 2020.

FERMINO, M. H. **Substratos: composição, caracterização e método de análise**. Guaíba: Agrolivros, 2014.

FERMINO, M. H.; ARAUJO, M. M.; AIMI, S. C.; TURCHETTO, F.; BERGHETTI, Á. L. P.; ZAVISTANOVICZ, T. C.; MIETH, P.; GRIEBELER, A. M.; VILELLA, J. M. Reutilization of residues as components of substrate for the production of *Eucalyptus grandis* seedlings. **CERNE**, v. 24, n. 2, p. 80–89, 2018.

FERMINO, M. H.; GONÇALVES, R. S.; SILVEIRA, J. R. P.; BATTISTIN, A.; TREVISAN, M.; BUSNELLO, A. C. Fibra de palmeira como substrato para hortaliças. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 4, p. 404–408, 2014.

FERMINO, M. H.; KÄMPF, A. N. Densidade de substratos dependendo dos métodos de análise e níveis de umidade. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 1, p. 75–79, 2012.

FIELDS, J. S.; OWEN, J. S.; ZHANG, L.; FONTENO, W. C. Use of the evaporative method for determination of soilless substrate moisture characteristic curves. **Scientia Horticulturae**, v. 211, p. 102–109, 2016.

FREIRE, R. R.; SCHMILDT, E. R.; LOPES, J. C.; CHAGAS, K.; MARQUES, H. I. P.; FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. P. B. DE; OTONI, W. C.; ALEXANDRE, R. S. Rooting responses of black pepper (*Piper nigrum* cv. Bragantina) as affected by chemical, physical and microbiological properties of substrates and auxin. **Australian Journal of Crop Science**, v.

11, n. 2, p. 126–133, 2017.

FREITAS, E. M.; GIOVANELLI, L. B.; DELAZARI, F. T.; SANTOS, M. L.; PEREIRA, S. B.; SILVA, D. J. H. Arugula production as a function of irrigation depths and potassium fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 197–202, 2017.

HARMAN, G. E.; HOWELL, C. R.; VITERBO, A.; CHET, I.; LORITO, M. *Trichoderma* species: opportunistic, avirulent plant symbionts. **Nature reviews. Microbiology**, v. 2, n. 1, p. 43–56, 2004.

HENÁNDEZ-APAOLAZA, L.; GASCÓ, A. M.; GASCÓ, J. M.; GUERRERO, F. Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 1, p. 125–131, 2005.

HERRERA-PARRA, E.; CRISTÓBAL-ALEJO, J.; RAMOS-ZAPATA, J. A. *Trichoderma* strains as growth promoters in *Capsicum annuum* and as biocontrol agents in *Meloidogyne incognita*. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 77, n. 4, p. 318–324, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017>. Acesso em 10 nov. 2019.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)**. Disponível em: <http://inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em 17 mar. 2020.

KALAJI, H. M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I. A.; CETNER, M. D.; ŁUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R. J. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 38, n. 4, p. 102, 2016.

KÄMPF, A. N. **Produção comercial de plantas ornamentais**. 1. ed. Guaíba/RS: Agropecuária, 2005.

KATO, A. K.; CELESTINO FILHO, P.; ROCHA, C. G. S.; FLOHIC, A.; REIS, S. L. Transferência de Tecnologia para a produção de mudas sadias de pimenteira-do-reino na Transamazônica, em viveiros comunitários. **Circular Técnica – Embrapa Amazônia Oriental**, n° 13, 17p., 2000.

KRAUSE, M. R.; MONACO, P. A.; HADDADE, I. R.; MENEGHELLI, L. A.; SOUZA, T. D. Aproveitamento de resíduos agrícolas na composição de substratos para produção de mudas de tomateiro. **Horticultura Brasileira**, v. 35, n. 2, p. 305–310, abr. 2017.

KRISHNAMURTHY, K. S.; ANKEGOWDA, S. J.; UMADEVI, P.; GEORGE, J. K. Black Pepper and water stress. In: RAO, N. K. S.; SHIVASHANKARA, K. S.; LAXMAN, R. H. (ed.). **Abiotic stress physiology of horticultural crops**. [S. l.]: Springer, 2016. p. 321 - 332.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo: Teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, 2002.

MACEDO, A.; CRESTANA, S. Avaliação da macroporosidade e da densidade de partículas do solo através da microtomografia e raios-x. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 763–771, 1999.

MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização e classificação de resíduo sólido “pó de rocha granítica” gerado na indústria de rochas ornamentais. **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1301–1304, 2008.

MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução Normativa SDA N° 27, de 05 de junho de 2006**. Dispõe sobre os fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes, que para serem produzidos, importados ou comercializados, deverão atender aos limites estabelecidos nos Anexos I, II, III, IV e V desta Instrução Normativa no que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-sda-27-de-05-06-2006-alterada-pela-in-sda-07-de-12-4-16-republicada-em-2-5-16.pdf>. Acesso em 20 nov. 2019.

MAPA. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Instrução normativa SDA N° 17, de 17 de maio de 2007**. Aprova os métodos analíticos oficiais para análise de substratos e condicionadores de solos. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/laboratorios/legislacoes-e-metodos/fertilizantes-substratos/copy_of_INSTRUONORMATIVASDAN17DE21DEMAIODE2007.pdf/view. Acesso em 20 nov. 2019.

MAPA. **Instrução Normativa no 05, de 10 de março de 2016**. Estabelece regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. Disponível em: http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/do1-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106. Acesso em 20 nov. 2019.

MAPA. **Registro Nacional de Sementes e Mudanças**. Disponível em: <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/renasem/>. Acesso em 13 abr. 2020.

MDIC. **Comex Stat**. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/>. Acesso em 17 dez. 2019.

MEDICI, L. O.; ROCHA, H. S.; CARVALHO, D. F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R. A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 6, p. 727–730, 2010.

MONK, S. **Programação com Arduino - Começando com Sketches**. 1. ed. Porto Alegre/RS: Bookman, 2013.

MORAES, B. C. DE; COSTA, J. M. N. DA; COSTA, A. C. L. DA; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 207–214, 2005.

OERKE, E.-C. Crop losses to pests. **The Journal of Agricultural Science**, v. 144, n. 1, p. 31–43, 2006.

OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 3, p. 197–200, 1968.

OLIVEIRA, M. S.; CARVALHO, D. F.; GOMES, D. P.; PEREIRA, F. A. C.; MEDICI, L. O. Production of cut sunflower under water volumes and substrates with coconut fiber. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 12, p. 859–865, 2018.

PARADELO, R.; VÁZQUEZ-NION, D.; SILVA, B.; GONZÁLEZ, Á.; PARADELO, R.; VÁZQUEZ-NION, D.; SILVA, B. Acidification of mixtures of granite powder and compost for reuse in plant production. **Compost Science & Utilization**, v. 24, n. 1, p. 1–10, 2016.

PARTELLI, F. L.; VIEIRA, H. D.; VIANA, A. P. Estimative of Black Pepper leaf area with basis on the leaf blade linear dimension. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1458–1461, 2007.

PEREIRA, A. I. A.; GUIMARÃES, J. DE J.; COSTA, J. V.; CANTUÁRIO, F. S. DE; SALOMÃO, L. C.; OLIVEIRA, R. C. DE; LUZ, J. M. Q. Growth of sweet pepper plants submitted to water tensions in soil and potassium silicate doses. **Horticultura Brasileira**, v. 37, n. 1, p. 82–88, 2019.

PRASATH, D.; VINITHA, K. B.; SRINIVASAN, V.; KANDIANNAN, K.; ANANDARAJ, M. Standardization of soil-less nursery mixture for black pepper (*Piper nigrum* L.) multiplication using plug-trays. **Journal of Spices and Aromatic Crops**, v. 23, n. 1, p. 1–9, 2014.

PREZOTTI, L. C.; GOMES, J. A.; DADALTO, G. G.; OLIVEIRA, J. A. **Manual de recomendação calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo - 5ª Aproximação**. Vitória/ES: CEDAGRO, 2007.

PSHIBYTKO, N. L.; ZENEVICH, L. A.; KABASHNIKOVA, L. F. Changes in the photosynthetic apparatus during fusarium wilt of tomato. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 53, n. 1, p. 25–31, 2006.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em 10 out. 2019.

RAVIV, M.; LIETH, J. H. Significance of soilless culture in agriculture. *In*: RAVIV, M.; LIETH, J. H. **Soilless Culture: Theory and Practice**. Amsterdam: Elsevier, 2008. p. 1 - 12.

ROCHA, S.; HENRIQUE, G.; FERREIRA, S.; CRISTINA, T.; REIS, S.; LETYCIA, F.; FÁTIMA, M. DE; MUNIZ, S.; PEREIRA, E. A. Caracterização de *Fusarium solani* f. sp. *piperis*, produção de fitotoxina e incidência da fusariose no norte de Minas Gerais. **Summa Phytopathologica**, v. 42, n. 1, p. 67–72, 2016.

RODY, Y. P.; ALMEIDA, A. Q. DE; RIBEIRO, A.; SEDIYAMA, G. C.; PEZZOPANE, J. E. M. Delimitação de sítios ambientais homogêneos no Estado do Espírito Santo, com base no relevo, solo e clima. **Ciência Rural**, v. 40, n. 12, p. 2493–2498, 2010.

ROJO, F. G.; REYNOSO, M. M.; FERREZ, M.; CHULZE, S. N.; TORRES, A. M. Biological

control by *Trichoderma* species of *Fusarium solani* causing peanut brown root rot under field conditions. **Crop Protection**, v. 26, n. 4, p. 549–555, 2007.

ROMÁN, P.; MARTÍNEZ, M. M.; PANTOJA, A. **Manual de Compostaje del Agricultor: Experiencias en América Latina**. 1. ed. Santiago/Chile: FAO: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura, 2013.

SAITER, A.; AGUIAR, L. A.; FERNANDES, M. C. A.; OLIVEIRA, L. A. A.; CORRÊA, A. L.; DINIS, J. A. M.; AZEVEDO, A.; FELIPE, E.; CASTILHO, A. M. C. **Efeito do agente de biocontrole *Trichoderma* na ocorrência dos mofos branco e cinzento em mudas de alface**. Disponível em: <http://www.pesagro.rj.gov.br/downloads/riorural/61> Efeito do agente de biocontrole *Trichoderma* na ocorrência dos mofos branco e cinzento em mudas de alface - Microbacia Caxambu - Petrópolis - RJ.pdf. Acesso em 10 dez. 2018.

SAMPAIO, R. A.; RAMOS, S. J.; GUILHERME, D. O.; COSTA, C. A.; FERNANDES, L. A. Produção de mudas de tomateiro em substratos contendo fibra de coco e pó de rocha. **Horticultura Brasileira**, v. 26, n. 4, p. 499–503, 2008.

SANTOS, F. E. V.; KUNZ, S. H.; CALDEIRA, M. V. W.; AZEVEDO, C. H. S.; RANGEL, O. J. P. Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 9, p. 971–979, 2014.

SCHEER, M. B.; CARNEIRO, C.; BRESSAN, O. B.; SANTOS, K. G. Produção de mudas de *Pimenta pseudocaryophyllus* (Gomes) Landrum com lodo de esgoto. **Revista Acadêmica de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 11, n. S1, p. 59–66, 2013.

SCHINDLER, U.; LISCHIED, G.; MÜLLER, L. Hydraulic performance of horticultural substrates - 3. Impact of substrate composition and ingredients. **Horticulturae**, v. 3, n. 7, p. 1–9, 2017.

SCHINDLER, U.; MÜLLER, L. Hydraulic Performance of Horticultural Substrates - 2. Development of an Evaluation Framework. **Horticulturae**, v. 3, n. 6, p. 1 - 6, 2017.

SCHINDLER, U.; MÜLLER, L.; EULENSTEIN, F.; MÜLLER, L.; EULENSTEIN, F. Hydraulic Performance of Horticultural Substrates - 1. Method for Measuring the Hydraulic Quality Indicators. **Horticulturae**, v. 3, n. 1, p. 5, 30 dez. 2017.

SECUNDINO, W.; ALEXANDRE, R. S.; SCHMILDT, E. R.; SCHMILDT, O.; MAGEVSKI, G. C.; MARTINS, J. P. R. Rhizogenic behavior of black pepper cultivars to indole-3-butyric acid. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 36, n. 3, p. 355–364, 2014.

SERRANO, L. A. L.; LIMA, I. M.; MARTINS, M. V. V. A cultura da pimenteira-do-reino do estado do Espírito Santo. **Documentos**, Vitória: Incaper, n. 146, 36p., 2006.

SERRANO, L. A. L.; MARINATO, F. A.; MAGIERO, M.; STURM, G. M. Produção de mudas de pimenteira-do-reino em substrato comercial fertilizado com adubo de liberação lenta. **Revista Ceres**, v. 59, n. 4, p. 512–517, ago. 2012.

SEZEN, S. M.; YAZAR, A.; TEKIN, S. Physiological response of red pepper to different

irrigation regimes under drip irrigation in the Mediterranean region of Turkey. **Scientia Horticulturae**, v. 245, p. 280–288, 2019.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

SHITYAKOV, S.; BIGDELIAN, E.; HUSSEIN, A. A.; HUSSAIN, M. B.; TRIPATHI, Y. C.; KHAN, M. U.; SHARIATI, M. A. Phytochemical and pharmacological attributes of piperine: A bioactive ingredient of black pepper. **European Journal of Medicinal Chemistry**, v. 176, p. 149–161, 2019.

SILBER, A. Chemical characteristics of soilless media. *In*: RAVIV, M.; LIETH, J. H. **Soilless culture: Theory and practice**. Amsterdam: Elsevier, 2008. p. 209 - 244.

SILVEIRA, E. B.; RODRIGUES, V. J. L. B.; GOMES, A. M. A.; MARIANO, R. L. R.; MESQUITA, J. C. P. Pó de coco como substrato para produção de mudas de tomateiro. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 2, p. 211–216, 2002.

SIVARAMAN, K.; KANDIANNAN, K.; PETER, K. V; THANKAMANI, C. K. Agronomy of black pepper (*Piper nigrum* L.) - a review. **Journal of Spices and Aromatic Crops**, v. 8, n. 1, p. 1–18, 1999.

STIRBET, A.; LAZÁR, D.; KROMDIJK, J.; GOVINDJEE. Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? **Photosynthetica**, v. 56, n. 1, p. 86–104, 2018.

STRASSER, R. J.; SRIVASTAVA, A.; GOVINDJEE. Polyphasic Chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria. **Photochemistry and Photobiology**, v. 61, n. 1, p. 32–42, 1995.

STRASSER, R. J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; SRIVASTAVA, A. Analysis of the Chlorophyll a fluorescence transient. *In*: PAPAGEORGIOU, G. C.; GOVINDJEE (Eds.). Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis, advances in photosynthesis and respiration series. Rotterdam: [s.n.]. p. 321–362.

SUMMERELL, B. A.; LESLIE, J. F. Fifty years of *Fusarium* how could nine species have ever been enough? **Fungal Diversity**, v. 50, n. 1, p. 135–144, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed editora. 2017.

TAKOORE, H.; AUMEERUDDY, M. Z.; RENGASAMY, K. R. R.; VENUGOPALA, K. N.; JEEWON, R.; ZENGIN, G.; MAHOMOODALY, M. F. A systematic review on black pepper (*Piper nigrum* L.): from folk uses to pharmacological applications. **Critical reviews in Food Science and Nutrition**, v. 59, n. S1, p. S210–S243, 2019.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev ed. Uberlandia: Embrapa, 2017.

THANKAMAN, C. K.; DINESH, R.; EAPEN, S. J.; KUMAR, A.; KANDIANNAN, K.; MATHEW, P. A. Effect of solarized potting mixture on growth of black pepper (*Piper nigrum* L.) rooted cuttings in the nursery. **Journal of Spices and Aromatic Crops**, v. 17, n. 2, p. 103–108, 2008.

THANKAMANI, C. K.; SRINIVASAN, V.; HAMZA, S.; KANDIANNAN, K.; MATHEW, P. A. Evaluation of nursery mixture for planting material production in black pepper (*Piper nigrum* L.). **Journal of Spices and Aromatic Crops**, v. 16, n. 2, p. 111–114, 2007.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; REIS, E. F. DOS; SILVA, A. G. DA. Produção de mudas de *Tectona grandis* em substratos formulados com biossólido. **CERNE**, v. 20, n. 2, p. 293–302, jun. 2014.

TREMACOLDI, C. R. **Principais Doenças Fúngicas da Pimenteira-do-reino no Estado do Pará e recomendações de controle**. Documentos – Embrapa Amazônia Oriental, n. 367, 23p., 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/883996/1/Doc367.pdf>. Acesso em 02 abr. 2019.

TSIMILLI-MICHAEL, M. Revisiting JIP-test: An educative review on concepts, assumptions, approximations, definitions and terminology. **Photosynthetica**, v. 57, n. Special issue, p. 90–107, 2019.

TSIMILLI-MICHAEL, M.; STRASSER, R. J. In vivo Assessment of Stress Impact on Plant's Vitality: Applications in Detecting and Evaluating the Beneficial Role of Mycorrhization on Host Plants. *In: Mycorrhiza*. Berlin: Springer, 2008. p. 679–703.

TSIMILLI-MICHAEL, M.; STRASSER, R. J. The energy flux theory 35 years later: formulations and applications. **Photosynthesis Research**, v. 117, n. 1, p. 289–320, 2013.

EPA. United States Environmental Protection Agency. **Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. Revision 2**. 1996. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>. Acesso em 30 mar. 2019.

VALENÇA, D. DA C.; CARVALHO, D. F. DE; REINERT, F.; AZEVEDO, R. A.; PINHO, C. F. DE; MEDICI, L. O. Automatically controlled deficit irrigation of lettuce in “organic potponics”. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 1, p. 52–59, jan. 2018.

VENTURA, J. A.; COSTA, H. Manejo da Fusariose da Pimenta-do-reino no estado do Espírito Santo. **Documentos**, Vitória: Incaper, n. 131, 16p., 2004.

WAGNER, A.; MICHALEK, W.; JAMIOLKOWSKA, A. Chlorophyll fluorescence measurements as indicators of fusariosis severity in tomato plants. **Agronomy Research**, v. 4, n. Special issue, p. 461–464, 2006.

YANG, H.; DU, T.; QIU, R.; CHEN, J.; WANG, F.; LI, Y.; WANG, C.; GAO, L.; KANG, S. Improved water use efficiency and fruit quality of greenhouse crops under regulated deficit irrigation in northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 193–204, 2017.

YUSUF, M. A.; KUMAR, D.; RAJWANSHI, R.; STRASSER, R. J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; GOVINDJEE; SARIN, N. B. Overexpression of γ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic *Brassica juncea* plants alleviates abiotic stress: Physiological and chlorophyll a fluorescence measurement. **Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics**, v. 1797, n. 8, p. 1428–1438, 2010.

ZU, C.; LI, Z.; YANG, J.; YU, H.; SUN, Y.; TANG, H.; YOST, R.; WU, H. Acid soil is associated with reduced yield, root growth and nutrient uptake in Black Pepper (*Piper nigrum* L.). **Agricultural Sciences**, v. 5, n. 5, p. 466–473, 2014.

ZU, C.; WU, G.; LI, Z.; YANG, J.; WANG, C.; YU, H.; WU, H. Regulation of Black Pepper inflorescence quantity by shading at different growth stages. **Photochemistry and Photobiology**, v. 92, n. 4, p. 579–586, 2016.