

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

RAFAEL DOMINGUES

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO, REGIME HÍDRICO E RESPOSTA BIOLÓGICA
DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) SOB AMBIENTE PROTEGIDO

PONTA GROSSA – PR
2016

RAFAEL DOMINGUES

ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO, REGIME HÍDRICO E RESPOSTA BIOLÓGICA
DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris* L.) SOB AMBIENTE PROTEGIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração: Agricultura. Linha de Pesquisa: Fisiologia, Melhoramento e Manejo de Culturas.

Orientador: Prof. Dr. André Belmont Pereira
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

PONTA GROSSA – PR
2016

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

D671 Domingues, Rafael
Atributos físicos do solo, regime hídrico e resposta biológica do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob ambiente protegido/ Rafael Domingues. Ponta Grossa, 2016.
107f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia - Área de Concentração: Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador: Prof. Dr. André Belmont Pereira.
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires.

1. *Phaseolus vulgaris* L.. 2. Umidade do solo. 3. Componentes de rendimento. 4. Parâmetros Ecofisiológicos. 5. Atributos físicos do solo. I. Pereira, André Belmont. II. Pires, Luiz Fernando. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Agronomia. IV. T.

CDD: 633.372



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “Atributos físicos do solo, regime hídrico e resposta biológica do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em ambiente protegido”.

Nome: Rafael Domingues

Orientador: André Belmont Pereira

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. André Belmont Pereira

Dr.^a. Regina Célia Matos Pires

Prof. Dr. Fabio Augusto Meira Cássaro

Data da Realização: 22 de novembro de 2016.

A aqueles que sempre me apoiaram, torceram
e vibraram durante a minha caminhada.

Dedico o trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus que me fortalece e me anima em seguir em frente. Pela força espiritual para a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia desta instituição, pela oportunidade de me integrar ao corpo discente.

À Capes pela concessão da bolsa de estudos.

À família pelo apoio e incentivo na vida acadêmica.

Ao professor Dr. André Belmont Pereira pela paciência na orientação, pelos ensinamentos, incentivo e apoio que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Luiz Fernando Pires pela paciência na orientação, pelos ensinamentos, incentivo e apoio que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. José Raulindo Gardingo pelo incentivo, apoio e conselhos dados durante a pós-graduação.

Ao professor e doutorando Luís Miguel Schiebelbein pelos ensinamentos, apoio e auxílio na montagem do experimento.

Ao professor Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa pelo apoio, auxílio na montagem do experimento e nas análises com o aparelho IRGA.

Aos demais professores da pós-graduação, que foram tão importantes pelas lições e ensinamentos dados.

Ao PhD Jadir Aparecido Rosa pela orientação e por disponibilizar a casa de vegetação do IAPAR para que o trabalho fosse possível de ser realizado.

Aos gêmeos Wesley Oliveira Martins, Wallyn Oliveira Martins e ao Thiago Santos que auxiliaram na condução do experimento, desde a montagem dos canteiros, peneiramento do solo e instalação elétrica e hidráulica.

Aos demais colegas e amigos que auxiliaram na execução deste trabalho.

“A grandeza não consiste em receber honras, mas em merecê-las”.

(Aristóteles)

DOMINGUES, R. **Atributos físicos do solo, regime hídrico e resposta biológica do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em ambiente protegido.** 2016, 107f. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

RESUMO

A produtividade vegetal é influenciada pelas condições ambientais sob as quais as plantas se desenvolvem. A água é o principal fator a ser controlado em ambiente protegido, visando à maximização da produção e qualidade dos produtos agrícolas. O potencial produtivo de uma cultura é extremamente condicionado pelas condições atmosféricas locais e pelo suprimento de água e nutrientes presentes no solo. O objetivo do trabalho foi de estudar o efeito da disponibilidade hídrica do solo sobre os componentes de rendimento de dois cultivares de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), bem como caracterizar os atributos físicos do solo e correlacioná-los com a resposta biológica das plantas. O experimento foi instalado em março de 2016 em casa de vegetação com a cultura do feijoeiro. O delineamento experimental empregado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial com seis repetições para os componentes de rendimento e quatro repetições para os atributos físicos do solo e parâmetros ecofisiológicos. Para esta cultura foram avaliados os componentes de rendimento de dois genótipos sob a influência de quatro níveis de umidade do solo. A umidade do solo dentro dos níveis estipulados no experimento foi monitorada através do uso de um Time Domain Reflectometer (TDR). Para cada unidade experimental instalada em estufa foram coletadas quatro amostras de solo para caracterizar os atributos físicos do solo. Essas amostras foram utilizadas para análises em laboratório: da densidade do solo (DS), de sua porosidade total (PT), da macroporosidade (MA), microporosidade (MI), condutividade hidráulica (K_0), curva de retenção de água (CRA) e curva de distribuição de poros (CDP). Os parâmetros ecofisiológicos foram analisados em quatro épocas distintas através de um analisador infravermelho de gases da marca LI-COR, modelo 6400-XT. Com este aparelho avaliaram-se fotossíntese líquida, condutância estomática, concentração de carbono intercelular, transpiração, eficiência fotossintética do uso da água e eficiência de carboxilação. Os resultados mostraram que o número de vagens por planta e a massa de grãos por planta foram afetados linearmente em função do “status” de água no solo. Massa de cem grãos do cultivar Tuiuiú foi superior a do cultivar Campos Gerais, independentemente das condições hídricas do solo. A DS e a MI apresentaram tendência linear crescente em função dos tratamentos de água adotados. A PT e a MA tiveram tendência linear decrescente diante do suprimento adequado ou inadequado de água no solo. O fator cultivar afetou a DS, a PT e a MA. As amostras de solo oriundas de níveis adequados de suprimento hídrico apresentaram maior retenção de água sob potenciais mátricos mais baixos e menor frequência de poros. Com exceção da transpiração, os demais parâmetros ecofisiológicos avaliados não mostraram efeito dos tratamentos estudados sobre a resposta biológica do feijoeiro. A CRA não refletiu marcadamente as condições de crescimento e desenvolvimento da cultura em função das condições hídricas do solo e dos genótipos de feijoeiro estudados. A CDP caracterizou mudanças na estrutura do solo decorrentes do preenchimento dos canteiros com solo no ambiente

protegido, bem como da ação dos tratamentos de água e cultura adotados neste estudo.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L. Umidade do Solo. Componentes de Rendimento. Parâmetros Ecofisiológicos. Atributos Físicos do Solo.

DOMINGUES, R. **Soil physical attributes, hydric regime and biological responsiveness of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under protected environment conditions**. 2016, 107f. Master's dissertation in Agronomy – State University of Ponta Grossa (UEPG).

ABSTRACT

Crop yield is affected by the environmental conditions under which plants grow and develop. Water is the main factor to be controlled under protected environments aiming at maximization of yield and grade of agricultural products. The productive potential of a crop is extremely conditioned by the local atmospheric conditions along with requirements for water and nutrients in the soil. The aim of the current work was to scrutinize the effect of soil water status on the yield components of two cultivars of beans (*Phaseolus vulgaris* L.), as well as characterize soil physical attributes and correlate them to the biological responsiveness of the plants under protected environmental conditions. The experiment was carried out in March of 2016 at a greenhouse belonging to the Agronomic Institute of Paraná (IAPAR) with beans. The experimental design taken into account here in was a completely randomized design at a factorial scheme with six replications for yield components and four replications for both soil physical attributes and crop ecophysiological parameters. For such a crop, yield components of two genotypes under the influence of four levels of soil humidity were assessed for agronomical purposes. Soil humidity within the stipulated levels at this trial was monitored by means of a Time Domain Reflectometer (TDR). For each wooden bed set up in the greenhouse soil samples were collected to characterize the soil physical attributes. Such samples were used for laboratory analyses of soil bulk density (DS), total porosity (PT), macroporosity (MA), microporosity (MI), hydraulic conductivity (K_0), water retention curve (CRA) and pores distribution curve (CDP). The ecophysiological parameters were analyzed at four different times through a LICOR Infrared Gas Analyzer (IRGA), model 6400-XT. By means of such an equipment net photosynthesis, stomachic conductance, intercellular carbon concentration, transpiration, photosynthetic water use efficiency, and carboxylation efficiency were evaluated. Number of pods per plant and grain mass per plant were to be affected linearly as a function of soil water status. A thousand grain mass for the cultivar Tuiuiú were higher than those related to the cultivar Campos Gerais, regardless of soil water conditions. DS and MI depicted an increasing linear behavior as a function of water treatments. PT and MA showed a decreasing linear behavior faced with adequate or inadequate soil water requirements. The cultivar factor affected DS, PT and MA. Soil samples from suitable water supply treatments resulted in a greater soil water retention under the lowest matric potentials along with a lower frequency of pores. A part from transpiration rates, all other ecophysiological parameters did not detect effect of the studied treatments on the biological response of the crop. CRA did not reflect remarkably both growth and development of the crop as a function of soil water conditions and also genotypes of beans in study. CDP featured changes in soil structure as a result of the filling of the beds with soil under the protected environment, as well as due to the impact of water and crop genotypes treatments considered in this study.

Key-words: *Phaseolus vulgaris* L. Soil water. Yield components. Ecophysiological parameters. Soil physical attributes.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Visualização das plantas de feijoeiro dispostas em canteiros em ambiente protegido.43
- Figura 2 – Detalhamento esquemático e dimensional (m) de um dos canteiros utilizado com a cultura do feijoeiro em ambiente protegido.....45
- Figura 3 – Regime de temperatura do ar: a) média; b) mínima; c) máxima (°C) do interior da casa de vegetação após a aplicação dos tratamentos de níveis de umidade do solo (dias após a emergência – DAE) durante a estação de crescimento do feijoeiro.....52
- Figura 4 – Regime de umidade relativa do ar: a) média; b) mínima; c) máxima (%) no interior da casa de vegetação após a aplicação dos tratamentos de níveis de umidade do solo (dias após a emergência – DAE durante a estação de crescimento do feijoeiro).....53
- Figura 5 – Valores diários da lâmina de irrigação adotada no período inicial de desenvolvimento das plantas de feijoeiro cultivadas sob condição de ambiente protegido em função de dias após a semeadura - DAS.54
- Figura 6 – Lâmina de irrigação aplicada ao longo da estação de crescimento de dois cultivares de feijoeiro e número de episódios de irrigação para cada tratamento de suprimento de água no solo em função de dias após a semeadura - DAS. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.....55
- Figura 7 – Fotossíntese líquida dos cultivares de feijoeiro cultivados sob condições de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Letras diferentes para cultivar, diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....58
- Figura 8 – Fotossíntese líquida em função de níveis de água no solo para cada época de avaliação sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Os dados de 23 e 30 DAE foram transformados por Box-Cox.58
- Figura 9 – Condutância estomática em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas realizadas aos 30 e 44 DAE foram transformados por Box-Cox e somados ao fator 2. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....59
- Figura 10 – Concentração de carbono intercelular dos cultivares de feijoeiro cultivados sob condições de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Letras diferentes para cultivar, diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....61
- Figura 11 – Concentração de carbono intracelular em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas realizadas aos 23, 30 e 36 DAE foram transformados por Box-Cox. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....62

Figura 12 – Transpiração dos cultivares de feijoeiro cultivados sob condições de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Letras diferentes para cultivar, diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....	63
Figura 13 – Transpiração em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas efetuadas aos 30 DAE foram transformados por Box-Cox. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....	64
Figura 14 – Eficiência fotossintética de uso de água em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas feitas aos 44 DAE foram transformados por Box-Cox.....	65
Figura 15 – Eficiência de carboxilação em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas feitas aos 23, 30, 36 e 44 DAE foram transformados por Box-Cox e somados ao fator 4. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....	66
Figura 16 – Número de vagens por planta da cultura do feijoeiro em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.....	69
Figura 17 – Número de grãos por vagem em função de níveis de água no solo para os cultivares de feijoeiro Campos Gerais e Tuiuiú, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....	69
Figura 18 – Massa de grãos por planta da cultura do feijoeiro em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. 2016.	70
Figura 19 – Massa de cem grãos da cultura do feijoeiro em função dos cultivares sob condição de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Letras diferentes para cultivar diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....	71
Figura 20 – Densidade do solo (DS, $g\ cm^{-3}$), porosidade total (PT, $cm^3\ cm^{-3}$), macroporosidade (MA, $cm^3\ cm^{-3}$), microporosidade (MI, $cm^3\ cm^{-3}$) e condutividade hidráulica (K_0 , $cm\ s^{-1}$) (valores transformados) sob a influência do fator cultivar de plantas de feijoeiro sob condições de ambiente protegido. Letras diferentes para o mesmo atributo físico do solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).....	73
Figura 21 – Densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) em função dos níveis de suprimento de água no solo sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.....	73
Figura 22 – Porosidade total ($cm^3\ cm^{-3}$) do solo em função dos níveis de suprimento de água no solo sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.	75

Figura 23 – Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) do solo em função dos níveis de suprimento de água no solo sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.	75
Figura 24 – Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) do solo em função dos níveis de suprimento de água no solo sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.	76
Figura 25 – Condutividade hidráulica (cm s^{-1}) em função dos níveis de água no solo (valores transformados) sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.	77
Figura 26 – Curvas de retenção de água ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) no solo comparando o desempenho entre os níveis de água no solo para cada cultivar de feijoeiro em ambiente protegido. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.....	79
Figura 27 – Curvas de retenção de água ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) no solo comparando o desempenho entre as cultivares de feijoeiro para cada nível de água no solo em ambiente protegido. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.....	81
Figura 28 – Curvas de distribuição de poros no solo em função do potencial matricial comparando o desempenho entre os níveis de água no solo para cada cultivar de feijoeiro em ambiente protegido. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.	83
Figura 29 – Curvas de distribuição de poros no solo em função do potencial matricial comparando o desempenho entre os cultivares de feijoeiro para cada nível de água no solo em ambiente protegido. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Atributos químicos e granulométricos do solo antes da instalação do experimento.....	44
Tabela 2 – Caracterização do crescimento e desenvolvimento da cultura do feijoeiro sob condição de ambiente protegido.....	46
Tabela 3 – Esquema da análise de variância para os componentes de rendimento das plantas de feijoeiro cultivadas sob condição de ambiente protegido.	51
Tabela 4 – Esquema da análise de variância para os parâmetros ecofisiológicos do feijoeiro e para os atributos físicos do solo em ambiente protegido.	51
Tabela 5 – Resumo da análise de variância para os parâmetros ecofisiológicos determinados através do IRGA: fotossíntese líquida (FL), condutância estomática (CE), concentração de carbono intercelular (Ci), Transpiração (Tr), eficiência fotossintética de uso de água (EUA), eficiência de carboxilação (ECi).	57
Tabela 6 – Resumo da análise de variância para número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP) e massa de cem grãos (MCG) em população de plantas de feijoeiro cultivadas sob condição de ambiente protegido.	68
Tabela 7 – Coeficientes de correlação para o confronto entre os componentes de rendimento número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP) e massa de cem grãos (MCG).....	72
Tabela 8 – Resumo da análise de variância para densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA), microporosidade (MI) e condutividade hidráulica (K_0) (dados transformados) sob influência dos fatores estudados em plantas de feijoeiro sob condições de ambiente protegido.	72
Tabela 9 – Números de irrigações aplicadas sobre o solo para os diferentes níveis de umidade.....	73
Tabela 10 – Coeficientes de correlação entre densidade do solo (DS, g cm^{-3}), porosidade total (PT, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), macroporosidade (MA, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), microporosidade (MI, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e condutividade hidráulica (K_0 , cm s^{-1}).....	78
Tabela 11 – Parâmetros das equações ajustadas da curva de retenção de água para cada cultivar e nível de água no solo.	78
Tabela 12 – Conteúdo volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) obtido após aplicação de cada potencial mátrico.	79
Tabela 13 – Coeficientes de correlação entre os componentes de rendimento do feijoeiro e dos atributos físicos do solo.....	86

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Massa de grãos corrigida	$MGP = \frac{PG-13}{100-13} \cdot mg$
Equação 2	Cálculo da massa de 100 grãos	$MCG = \frac{MGP \cdot 100}{NG}$
Equação 3	Eficiência fotossintética do uso da água	$EUA = \frac{FL}{Tr}$
Equação 4	Eficiência de carboxilação	$ECi = \frac{FL}{Ci}$
Equação 5	Ajuste de van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^{1/m}}$
Equação 6	Restrição de Mualem (1986)	$m = 1 - \left(\frac{1}{n}\right)$
Equação 7	Curva de distribuição de poros	$\frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r) \cdot m \cdot n \cdot \alpha \cdot (\alpha \cdot h)^{n-1}}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^{m+1}}$
Equação 8	Porosidade total	$Pt = 1 - \left(\frac{Ds}{Dp}\right),$
Equação 9	Correção de Box-Cox	$Y_i(\lambda) = \begin{cases} \ln(X_i), & \text{se } \lambda = 0, \\ \frac{X_i^\lambda - 1}{\lambda}, & \text{se } \lambda \neq 0 \end{cases}$

LISTA DE ABREVIATURAS

Al ³⁺	Alumínio (acidez trocável)
Ca ²⁺	Cálcio
C ₃	Plantas de metabolismo fotossintético C ₃
C ₄	Plantas de metabolismo fotossintético C ₄
CAD	Capacidade de água disponível
CDP	Curva de distribuição de poros
CE	Condutância estomática
Ci	Concentração de carbono intercelular
CO	Carbono orgânico
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CRA	Curva de retenção de água
CTC	Capacidade de troca catiônica
C.V.	Coefficiente de Variação
DAE	Dias após emergência
DAS	Dias após a semeadura
DP	Densidade de partículas
DS	Densidade do Solo
ECi	Eficiência de carboxilação
ET ₀	Evapotranspiração de referência
ET _c	Evapotranspiração da cultura
EUA	Eficiência fotossintética do uso da água
FAO	Food and Agriculture Organization
FCA	Função capacidade de água
FL	Fotossíntese Líquida
G.L.	Graus de Liberdade
H+Al	Acidez potencial
IAF	Índice de Área Foliar

IAPAR	Instituto Agronômico do Paraná
IRGA	Infrared Gas Analyzer
K_0	Condutividade hidráulica saturada do solo
K^+	Potássio
K_c	Coeficiente de cultura
m	Saturação por alumínio
MA	Macroporosidade
MCG	Massa de cem grãos
Mg^{2+}	Magnésio
MGP	Massa de grãos por planta
MI	Microporosidade
NGV	Número de grãos por vagem
NPK	formulação nitrogênio, fósforo e potássio
NVP	Número de vagens por planta
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico (acidez ativa)
PT	Porosidade Total
S-N-K	Student-Newman-Keuls
TDR	Time Domain Reflector
Tr	Transpiração
V	Saturação por bases

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Alfa – parâmetro empírico da equação de van Genuchten
$^{\circ}$	Graus
$^{\circ}\text{C}$	Graus célsius
'	Minutos
n	Parâmetro empírico da equação de van Genuchten
m	Parâmetro empírico da equação de van Genuchten
%	Por cento
Ψ_m	Potencial mátrico do solo
"	Segundos
U	Umidade do solo a base de massa
θ	Umidade volumétrica
θ_s	Umidade de saturação
θ_r	Umidade residual

LISTA DE UNIDADES

cm	centímetros
cm de H ₂ O	centímetros de coluna de água
cm s ⁻¹	centímetros por segundo
cm ³	centímetros cúbicos
cm ³ cm ⁻³	centímetros cúbicos por centímetros cúbicos
cmol _c dm ⁻³	centi-mol de carga por decímetro cúbico
g	gramas
g kg ⁻¹	grama por quilograma
kg ha ⁻¹	kilograma por hectare
L h ⁻¹	litros por hora
m	metros
mg dm ⁻³	miligrama por decímetro cúbico
mm	milímetro
mm h ⁻¹	milímetro por hora
m ³ m ⁻³	metro cúbico por metro cúbico
mm d ⁻¹	milímetro por dia
μmol de CO ₂ m ⁻² s ⁻¹ quadrado e segundo	micromol de dióxido de carbono por metro quadrado e segundo
μmol de CO ₂ mol ⁻¹	micromol de dióxido de carbono por mol
[(μmol de CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) (mmol de H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) ⁻¹]	micromol de dióxido de carbono por metro quadrado e segundo por milimol de água por metro quadrado e segundo
[(μmol de CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) (μmol de CO ₂ mol ⁻¹) ⁻¹]	micromol de dióxido de carbono por metro quadrado e segundo por micromol de dióxido de carbono por mol
mmol de H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	milimol de água por metro quadrado e segundo

mol de H₂O m⁻² s⁻¹

s cm⁻¹

mol de água por metro quadrado e segundo

segundo por centímetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 OBJETIVOS.....	23
2.1 OBJETIVO GERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.1 CULTURA DO FEIJOEIRO	24
3.2 COMPONENTES DE RENDIMENTO DO FEIJOEIRO	24
3.3 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE AS CULTURAS	25
3.4 PARÂMETROS ECOFISIOLÓGICOS E SUA INFLUÊNCIA NAS CULTURAS ..	26
3.5 PARÂMETROS ECOFISIOLÓGICOS DO FEIJOEIRO.....	28
3.6 IMPORTÂNCIA DA ÁGUA PARA AS CULTURAS.....	29
3.7 INFLUÊNCIA E COMPORTAMENTO DA ÁGUA NO CULTIVO DO FEIJOEIRO	30
3.8 COMPORTAMENTO DA ÁGUA NO SOLO	31
3.9 IRRIGAÇÃO	32
3.9.1 Irrigação do feijoeiro	33
3.9.2 Irrigação Localizada: Gotejamento	35
3.9.3 Controle de Irrigação	35
3.10 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DAS CULTURAS	36
3.11 EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ESTUFAS DE PLÁSTICO	38
3.12 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO FEIJOEIRO	39
4 MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL, CLIMA E SOLO	43
4.2 CONDUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	44
4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, TRATAMENTOS E CULTIVOS	46

4.4 VARIÁVEIS DAS PLANTAS AVALIADAS	47
4.4.1 Componentes de Rendimento	47
4.4.2 Parâmetros Ecofisiológicos	48
4.5 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	49
4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E FORNECIMENTO DE ÁGUA.....	52
5.2 DESEMPENHO ECOFISIOLÓGICO.....	56
5.2.1 Fotossíntese Líquida (FL).....	56
5.2.2 Condutância Estomática (CE)	59
5.2.3 Concentração de Carbono Intercelular (Ci)	60
5.2.4 Transpiração (Tr).....	63
5.2.5 Eficiência Fotossintética do Uso da Água (EUA).....	64
5.2.6 Eficiência de Carboxilação (ECi)	66
5.3 NÚMERO DE VAGENS POR PLANTA (NVP), NÚMERO DE GRÃOS POR VAGEM (NGV), MASSA DE GRÃOS POR PLANTA (MGP) E MASSA DE CEM GRÃOS (MCG).....	67
5.4 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	72
5.4.1 Densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA), microporosidade (MI) e condutividade hidráulica (K ₀)	72
5.4.2 Curva de retenção de água (CRA) e curva de distribuição de poros (CDP).....	78
5.5 CORRELAÇÕES ENTRE COMPONENTES DE RENDIMENTO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO.....	85
6 CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

O estudo das condições climáticas e a sua influência na agricultura, a cada momento ganha mais importância entre os profissionais envolvidos com atividades agrícolas e produtores rurais. Isto porque a literatura reporta que cerca de 80% da variabilidade da produtividade agrícola é resultado do efeito do clima e das condições do tempo vigentes sobre a resposta fisiológica de espécies vegetais cultivadas em uma dada região ou local.

Conhecer o “status” de água de plantas superiores é muito importante em estudos ecofisiológicos e agrometeorológicos com vistas à maximização da produção e à qualidade dos produtos agrícolas. O “status” de água na planta é condicionado pelas condições hídricas do solo e pela demanda evaporativa da atmosfera, afetando o acúmulo de matéria seca na planta, bem como o crescimento vegetativo da maioria das culturas (EVANGELISTA e PEREIRA, 2003; AMINIFAR, 2012).

A água extraída do solo pelas plantas é evaporada pelas folhas devido à influência direta ou indireta da demanda evaporativa da atmosfera (FONTANA, 1992; CARLESSO, 1995). A resposta à demanda evaporativa da atmosfera é controlada pelas condições meteorológicas locais e pela cultura (CARLESSO, 1995). Além disso, a parte aérea das plantas afeta a absorção líquida de radiação, a temperatura e as propriedades aerodinâmicas do “dossel” (ROBERTSON, 1991).

Nas casas de vegetação não é apenas o fornecimento de água para as plantas cultivadas que pode ser controlado. Pode-se também controlar o seu consumo, através da adoção de sistemas de controle ambiental, de modo a se alterar o regime vigente dos elementos meteorológicos responsáveis pelas taxas de transpiração das plantas, como a umidade relativa, a temperatura do ar e a radiação solar global (EVANGELISTA e PEREIRA, 2003).

As plantas necessitam de solos com condições físicas que favoreçam o seu crescimento e desenvolvimento (COLLARES et al., 2006; MOURA et al., 2008). Os atributos físicos do solo não atuam de forma isolada, mas como um sistema dinâmico e complexo, interagindo com os parâmetros de distribuição de água na planta e interferindo sobre o crescimento e o desenvolvimento das plantas (BEUTLER et al., 2009).

No cultivo em vasos os solos apresentam diferenças em relação aos solos em campos de produção, visto que valores diferentes são esperados para a capacidade de campo em vaso. (CASAROLI e LIER, 2008). Nessas condições o solo é desagregado, peneirado e posteriormente colocado em vasos (BORTOLON et al., 2009).

O potencial produtivo de uma cultura pode ser definido através do seu rendimento quando cultivado em ambientes sob os quais esta se encontra bem adaptada, sem limitações de nutrientes e sem estresses bióticos e abióticos (ARGENTA et al., 2003).

A cultura do feijoeiro estudada nesse trabalho se encontra no grupo de alimentos de maior importância para a população brasileira, sendo considerada uma das principais culturas de subsistência do país. O feijoeiro é classificado como uma planta sensível, tanto à deficiência hídrica quanto ao excesso de água no solo (NÓBREGA et al., 2001). Déficit de água, temperaturas extremas e baixa umidade atmosférica afetam negativamente o desempenho e o rendimento das culturas agrícolas (HIRT e SHINOZAKI, 2003; SZILGYI, 2003).

Assim, estudar o efeito da disponibilidade de água no solo sob ação do regime vigente dos elementos meteorológicos em ambiente protegido sobre a resposta fisiológica do feijoeiro e de seus componentes de rendimento constitui informação útil para o produtor rural. As condições impostas no experimento em estudo governam a expressão da potencialidade produtiva da cultura e da qualidade da produção a ponto de definirem o nível de rentabilidade do produtor na região dos Campos Gerais do Paraná.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o efeito da disponibilidade hídrica do solo sobre os componentes de rendimento de dois cultivares de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), bem como caracterizar os atributos físicos do solo e correlacioná-los com a resposta biológica das plantas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Verificar o efeito de diferentes níveis de suprimento hídrico do solo sobre os componentes de rendimento de dois cultivares de feijoeiro.
- (ii) Analisar o efeito de diferentes níveis de suprimento hídrico do solo sobre os parâmetros ecofisiológicos de dois cultivares de feijoeiro.
- (iii) Avaliar o efeito de diferentes níveis de suprimento hídrico do solo sobre os atributos físicos do solo.
- (iv) Caracterizar as modificações na estrutura do solo por meio da Curva de Retenção de Água (CRA) e Curva de Distribuição de Poros (CDP).
- (v) Examinar o possível efeito dos atributos físicos do solo sobre os componentes de rendimento dos genótipos de feijoeiro estudados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CULTURA DO FEIJOEIRO

A cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) apresenta grande destaque no Brasil, por ser produto agrícola apreciado pela população e também, por fazer parte de sua alimentação básica (CUNHA et al., 2013). Trata-se de cultura agrícola que possui elevada importância econômica, tanto nacional como regionalmente, sendo, portanto, uma das principais fontes de proteína na alimentação humana e com uma distribuição geográfica bastante ampla (BARBANO, 2003; CUNHA et al., 2003).

Com uma produção de três milhões de toneladas e uma produtividade média de 1013 kg ha⁻¹ referente à safra 2014/2015, (CONAB, 2016) o Brasil destaca-se como o maior produtor e consumidor mundial dessa espécie agrícola, sendo os principais estados produtores o Paraná, a Bahia, Minas Gerais, Mato Grosso, São Paulo e Goiás (CARVALHO et al., 2014). Preferencialmente o feijoeiro é cultivado por pequenos produtores rurais, sendo a cultura principal a ser considerada pela agricultura familiar (LOPES et al., 2011).

O feijoeiro apresenta ampla adaptação edafoclimática, podendo ser cultivado durante todo o ano em quase todo o território nacional, pois não apresenta sensibilidade ao fotoperíodo, desde que não ocorram temperaturas e umidades extremas (ABRANTES et al., 2011). As condições climáticas para o ótimo desenvolvimento da cultura estão em ambientes com temperatura do ar entre 15°C e 27°C (BULISANI et al., 1987).

A ocorrência de déficit hídrico no solo pode prejudicar o desenvolvimento do feijoeiro, principalmente durante a floração (BARBANO, 2003). A duração, a intensidade, a frequência e a época de ocorrência do estresse ambiental interferem marcadamente na maioria dos processos fisiológicos e morfológicos das plantas, afetando negativamente os componentes do rendimento da cultura em estudo (NÓBREGA et al., 2004).

3.2 COMPONENTES DE RENDIMENTO DO FEIJOEIRO

A produtividade tem importância econômica, porém de grande complexidade e com impactos que residem na expressão e associação de diferentes componentes (CARVALHO et al., 2002; AMORIM et al., 2008). Apesar da utilidade do coeficiente

de correlação simples para o entendimento desse caráter complexo, resposta fisiológica da cultura do feijoeiro e expressão de muitos de seus componentes não determinam a importância relativa de influências diretas e indiretas dos caracteres que compõem o rendimento de grãos (FURTADO et al., 2002). De acordo com Fehr (1987), o potencial de rendimento de grãos é dependente de processos fisiológicos que podem ter influência direta e/ou indireta sobre este caráter.

Os principais parâmetros envolvidos no rendimento final da cultura do feijoeiro são: número de vagens por unidade de área, número de grãos por vagem e massa de grãos (ZILIO et al., 2011). O número de vagens por unidade de área é determinado pela população de plantas, pela produção de flores por planta e pelo número de flores que efetivamente desenvolvem vagens (ZILIO et al., 2011). Segundo Ramos Junior et al. (2005), o tamanho de grãos e o número de grãos por vagem são os componentes que mais influenciam a produtividade do feijão.

Os componentes de rendimento são determinados pelo genótipo, influenciados pelas condições ambientais impostas durante o ciclo da cultura, pelo manejo adotado durante a implantação e condução da lavoura e pelo nível tecnológico adotado pelo agricultor (BEZERRA et al., 2007; KAPPES et al., 2008). Poderá haver efeito compensatório no rendimento de grãos, com a diminuição do número de vagens e de grãos por planta de feijão e do aumento da massa dos grãos, em resposta ao aumento da população de plantas por área (ZILIO et al., 2011). Em feijoeiro, o efeito compensatório nos componentes de rendimento foi observado quando esta cultura foi submetida à densidade de plantas menores que a recomendada (SHIMADA et al., 2000).

3.3 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE AS CULTURAS

A agricultura é a atividade econômica mais influenciada pelas condições climáticas, sendo altamente sensível a variabilidade tanto temporal como espacial (SENTELHAS e MONTEIRO, 2009; BANNAYAN e SANJANI, 2011). Os elementos meteorológicos locais afetam não apenas os processos metabólicos das plantas, diretamente relacionados à produção vegetal, como também as mais diversas atividades no campo. Em torno de 80% da variabilidade da produção agrícola no mundo é decorrente da variabilidade das condições meteorológicas durante o ciclo da cultura, principalmente para as culturas de sequeiro, já que não é possível a

adoção de nenhuma medida de controle sobre esses fenômenos naturais (SENTELHAS e MONTEIRO, 2009).

O clima não só afeta o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas, mas também influencia a relação das plantas com microrganismos, insetos, fungos e bactérias, os quais podem favorecer a ocorrência de pragas e doenças, e que exige medidas de controle adequadas. Além disso, várias práticas agrícolas, como o preparo do solo, a semeadura, a adubação, a irrigação, as pulverizações, a colheita, entre outras, dependem de condições específicas de tempo e de umidade no solo para que possam ser realizadas de forma eficiente (PEREIRA et al., 2002).

Em geral, os principais elementos meteorológicos que influenciam o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas são chuva, temperatura do ar e radiação solar (HOOGENBOOM, 2000), havendo ainda a influência do fotoperíodo, da umidade do ar e do solo e da velocidade do vento (PEREIRA et al., 2002; MAVI e TUPPER, 2004).

A interação entre os elementos meteorológicos locais com a cultura pode ser complexa, resultando em uma variedade de condições ambientais em constante mudança (SENTELHAS e MONTEIRO, 2009). Condições climáticas específicas são necessárias para o crescimento ideal das culturas (MAVI e TUPPER, 2004), sendo que cada cultura tem suas principais características e informações (SENTELHAS e MONTEIRO, 2009). Desta maneira, a compreensão das particularidades de cada cultura e das condições do ambiente agrícola são muito importantes para um sistema de produção mais eficiente e sustentável (SIVAKUMAR et al. 2000).

3.4 PARÂMETROS ECOFISIOLÓGICOS E SUA INFLUÊNCIA NAS CULTURAS

No processo fotossintético, a água é exigida para a liberação de prótons e elétrons da fase fotoquímica, além da regulação da abertura estomática, a qual possibilita a absorção de dióxido de carbono (CO_2) e a mobilização de fotoassimilados (CHAVARRIA e SANTOS, 2012). A intensidade luminosa, a temperatura, a concentração de CO_2 , o teor de nitrogênio da folha e a umidade do solo são fatores que influenciam a atividade fotossintética dos vegetais (MARENCO e LOPES, 2005). A abertura e o fechamento dos estômatos estão relacionados principalmente com a intensidade de luz e o estado de hidratação da folha. Assim, o funcionamento dos estômatos e a área foliar influenciam a produtividade vegetal. O

primeiro fator por controlar a absorção de CO₂ e o segundo por determinar a interceptação de luz (COSTA e MARENCO, 2007).

A fitomassa total produzida é o produto da interceptação total de luz e da eficiência de utilização desta luz no processo fotossintético. A interceptação de luz está diretamente relacionada com o índice de área foliar (IAF), o qual varia de acordo com a idade fisiológica e as características genótípicas de espécies vegetais com metabolismo fotossintético intermediário entre C₃ e C₄, sendo o caso particular da cultura da mandioca (EI-SHARKAWY et al., 1989). Estes autores reportam que o rendimento biológico da mandioca não é sinônimo de fitomassa total, pois o IAF ótimo para produção de raízes é consistentemente menor que aquele ótimo para a produção de fitomassa total, estando os valores elevados de IAF relacionados com elevados valores de índice de colheita.

O potencial de água da folha indica o seu estado energético, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera (BERGONCI et al., 2000), sendo que variações no potencial hídrico da folha podem influenciar a taxa de assimilação de carbono da planta (HSIAO, 1973). Isto ocorre, pois no caso da planta perder água a taxa superior à sua capacidade de absorção e transporte o potencial hídrico da folha reduz, ocasionando o fechamento estomático e a redução da fotossíntese (COSTA e MARENCO, 2007). Nos momentos mais quentes do dia a condutância estomática diminui para evitar que o potencial hídrico da folha reduza a valores inferiores aos níveis considerados críticos para a estabilidade do sistema de transporte de água (OREN et al., 1999). O nível mínimo que o potencial hídrico pode atingir durante os horários de transpiração intensa depende, tanto de fatores genéticos como de fatores ambientais (COSTA e MARENCO, 2007). No entanto, em situação de baixa disponibilidade de água no solo as plantas reduzem a perda de água ao reduzir a condutância estomática (COSTA e MARENCO, 2007). Para favorecer a turgescência celular em situações de estresse hídrico ocorrem ajustes no metabolismo celular, por exemplo, através do acúmulo de substâncias orgânicas, tais como a prolina, o que contribui para a osmorregulação (SILVA et al., 2004).

Os estômatos respondem à concentrações de CO₂: a condutância estomática diminui com o aumento da concentração de CO₂ atmosférico (MOTT, 1988; EAMUS e JARVIS, 1989; CENTRITTO et al., 1999; MEDLYN et al., 2001), sendo esta última variável relacionada à concentração de CO₂ intercelular (MOTT, 1988). A redução da condutância estomática em resposta ao aumento na concentração CO₂ atmosférico

será, de certa forma, compensada pelo efeito do aumento dos níveis de CO₂ no interior das células por ocasião da fotossíntese. Isso pode também reduzir a taxa de transpiração vegetal a ponto de elevar significativamente a eficiência do uso da água pelas plantas (MORISON, 1985; EAMUS e JARVIS, 1989; DRAKE et al., 1997). O aumento da eficiência do uso da água está relacionado à redução da taxa de consumo de água por unidade de área foliar, mas o aumento simultâneo na área foliar total como um resultado do aumento de CO₂ pode parcialmente compensar este aumento na eficiência do uso da água (LIMA et al., 2003).

A taxa de transpiração de espécies florestais pode manter-se constante até que um nível crítico de umidade do solo seja atingido (DUNIN e ASTON, 1984), porém muitos estudos sugerem a existência de um declínio na transpiração com a redução do conteúdo de água no solo (GOLLAN et al., 1985).

3.5 PARÂMETROS ECOFISIOLÓGICOS DO FEIJOEIRO

A condição hídrica das plantas está muito relacionada aos processos fisiológicos de importância para as plantas (OLIVEIRA et al., 2005). Processos como transpiração, fotossíntese, respiração e crescimento são muito influenciados pelas mudanças ocorridas no estado hídrico das folhas (HSIAO, 1973). De acordo com Floss (2004), cerca de 90% da produção biológica das plantas ocorre em resposta à atividade fotossintética.

As respostas do feijoeiro são determinadas pelo microambiente e num certo período de tempo, muitos dos sintomas visuais de estresse hídrico são consequências de alterações nas respostas fisiológicas da planta, que podem ser detectáveis com antecedência (OLIVEIRA et al., 2005). De acordo com Guimarães (1998), a intensidade dos danos provocados pelo estresse depende da duração, intensidade, frequência e época de sua ocorrência. Em sementes, a deficiência hídrica provoca redução da germinação; no período vegetativo ocorre, além de outros efeitos, a redução de área foliar; durante a floração provoca abscisão de flores com consequente redução do número de vagens por planta e, no enchimento de grãos reduz o número de grãos e peso de vagens (OLIVEIRA et al., 2005).

Vieira et al. (1989), trabalhando com duas cultivares de feijoeiro (Aroana 80 e Aeté 3), suspenderam a irrigação por um período de 17 dias, verificando que os valores da resistência estomática foram maiores na face superior do que na inferior,

com valores mínimos de 6 e 2 s cm⁻¹, respectivamente, em ambas as cultivares. Em valores de potencial hídrico foliar menores que -12000 a -10000 cm de H₂O, considerados como críticos a deficiência hídrica em feijoeiro, tem sido observado comportamento discrepante da condutância estomática (KANEMASU e TANNER, 1969; HSIAO, 1973).

Guoju et al. (2016), numa pesquisa com feijoeiro conduzida no noroeste da China, avaliaram aumentos de 0°C; 0,5°C; 1,0°C; 1,5°C e 2,0°C sobre a cultura verificando que a fotossíntese não sofreu grandes flutuações, porém a transpiração variou significativamente. Ainda os presentes autores obtiveram aumento na eficiência fotossintética do uso da água com valores crescentes de temperatura.

3.6 IMPORTÂNCIA DA ÁGUA PARA AS CULTURAS

O conteúdo de água de plantas superiores constitui provavelmente o fator mais importante a ser considerado em estudos agrometeorológicos, com o intuito de se obter a maximização da produtividade de modo a assegurar qualidade aos produtos agrícolas comercializáveis (EVANGELISTA e PEREIRA, 2003). A sua deficiência induz adaptações fisiológicas e morfológicas, como fechamento parcial ou total dos estômatos, reduzindo assim a fotossíntese, afetando adversamente o crescimento da cultura e sua produtividade primária (PEREIRA et al., 2002).

Considerado o fator climático de maior efeito sobre a produtividade agrícola, a disponibilidade hídrica rege a distribuição das espécies vegetais nas diferentes zonas climáticas do globo terrestre (FIOREZE et al., 2011). A disponibilidade de água afeta a produção biológica do solo, tanto para fins florestais como agrônômicos (DANE e TOPP, 2002). Em ambientes com restrição hídrica a produtividade de plantas cultivadas é frequentemente afetada por características da planta que permitem a manutenção do status hídrico durante o secamento do solo (BLUM, 2005).

Em áreas agrícolas as chuvas contribuem com 65% da produção mundial de alimentos, enquanto que os 35% restantes advêm da irrigação. O uso excessivo e a má gestão dessa água de irrigação têm ocasionado algumas vezes efeitos negativos sobre a qualidade do solo (MAVI e TUPPER, 2004).

3.7 INFLUÊNCIA E COMPORTAMENTO DA ÁGUA NO CULTIVO DO FEIJOEIRO

O feijoeiro apresenta exigência hídrica satisfeita quando a precipitação pluvial durante o período da sementeira à maturação fisiológica situa-se entre 300 e 400 mm, com distribuição uniforme (MALUF e CAIAFFO, 1999). Entretanto, as plantas são pouco tolerantes ao déficit hídrico, podendo ocasionar queda significativa de produtividade, principalmente nos estádios de florescimento e enchimento de grãos, devido a sua baixa capacidade de recuperação após o estresse hídrico e do sistema radicular pouco desenvolvido (MOUHOUCHE et al., 1998).

A exigência de água pela cultura é variável de acordo com o estágio de desenvolvimento, com valor mínimo na germinação até valor máximo na formação das vagens, decrescendo a partir do início da maturação (NÓBREGA et al., 2001). Guimarães et al. (1982) obtiveram valores de 2,3; 7,1 e 1,5 mm d⁻¹ de consumo hídrico, respectivamente, aos 10 dias após a germinação, durante a floração e início da maturação. Um déficit hídrico de 50% na fase vegetativa pode reduzir o rendimento em apenas 10%, enquanto que o mesmo déficit provoca reduções de 55% e 38% na produção, quando este ocorre, respectivamente, na floração e durante o enchimento das vagens (CALVACHE et al., 1997).

Bascur et al. (1985), analisando o efeito da umidade do solo sobre diferentes cultivares de feijão, observaram que plantas submetidas a estresse hídrico apresentaram redução considerável da área foliar e de rendimento. Entretanto o acúmulo de matéria seca em talos e ramos foi maior. Estes autores verificaram também que variedades de feijoeiro com resistência à seca apresentam maior manutenção foliar, o que resulta em maior massa de matéria seca e de produtividade.

Guimarães e Zimmermann (1985) verificaram que os genótipos mais resistentes à seca apresentaram potenciais de água na folha mais altos e sistemas radiculares mais desenvolvidos no perfil do solo quando comparados a materiais mais suscetíveis. A adaptação às condições de deficiência hídrica está relacionada à manutenção de boa condição hídrica nos tecidos das plantas (KRAMER e BOYER, 1995).

3.8 COMPORTAMENTO DA ÁGUA NO SOLO

A água no solo é fator de relevante importância para o ciclo hidrológico, o qual controla o intercâmbio entre a atmosfera e a água subterrânea. A água exerce influência forte sobre a maioria dos atributos físicos, químicos e biológicos e processos que ocorrem no solo, tais como, o movimento de água, compactação, aeração e desenvolvimento radicular (DANE e TOPP, 2002; RODRIGUES et al., 2012). A água no solo atua como um lubrificante e como agente de ligação entre as partículas do solo, de forma que: influencia a estabilidade de suas estruturas e a resistência do solo. Atua como agente de transporte para os produtos químicos inorgânicos dissolvidos e componentes biológicos em suspensão que estão envolvidos nos processos de desenvolvimento e degradação dos solos (DANE e TOPP, 2002).

Através da influência que exerce sobre os processos físicos e químicos naturais, os sistemas vivos dependem da água do solo. A produção biológica do solo, tanto em florestas como em culturas agrícolas, é influenciada principalmente pela disponibilidade de água. Esta, por sua vez, é dependente dos atributos físicos do solo e da profundidade efetiva do sistema radicular das culturas (DANE e TOPP, 2002).

O conhecimento do movimento de água no solo é essencial para resolver os problemas que envolvem irrigação, drenagem, conservação da água, recarga e poluição de aquífero, bem como aqueles relacionados à infiltração e controle de escoamento (SILVA e COELHO, 2014).

A avaliação da disponibilidade da água no solo requer desenvolvimento de estudos muito complexos em função da heterogeneidade de seus atributos físicos, tais como a sua densidade, o tamanho, a forma e a disposição de poros, a textura, a estrutura, a superfície específica das partículas, o teor de matéria orgânica, dentre outros fatores do ambiente agrícola (RODRIGUES et al., 2012). A intensidade de retenção de água pelo solo varia no espaço e no tempo, sendo igualmente válido para o regime hidrológico do solo. A infiltração da água ocorre diretamente pela ação da gravidade e ainda sob o efeito de outros componentes, tais como: capilaridade, competição entre diferentes potenciais da água no solo, pressão do ar no solo; sendo que o ar que se encontra aprisionado em seus poros diminui o coeficiente de infiltração (RODRIGUES et al., 2012). Durante o processo de infiltração o perfil do

solo é constituído pela zona de saturação, em que o solo está saturado. Em seguida vem a zona de transição com um rápido decréscimo de água. Posteriormente existe a zona de transmissão, que é parte do perfil em que a água é transmitida com variações muito pequenas no conteúdo de água. Abaixo dessa zona tem-se a zona de umedecimento, a qual se refere a uma região de variação relativamente rápida do conteúdo de água. Por fim, tem-se a frente de molhamento, a qual compreende uma região na qual o gradiente de conteúdo de água apresenta grande variação, representando o limite visível da infiltração da água no perfil do solo (LIBARDI, 2005).

3.9 IRRIGAÇÃO

A agricultura irrigada é importante estratégia de manejo dos recursos hídricos, a qual possibilita a otimização da produção de alimentos em todo o mundo (MANTOVANI et al., 2007), e visa atender as necessidades hídricas das culturas (PEREIRA et al., 2002). O manejo da irrigação promove o desenvolvimento da sustentabilidade no campo, com geração de empregos e renda de forma estável (MANTOVANI et al., 2007). A irrigação é atividade fundamental em regiões que apresentam secas regulares (PEREIRA et al., 2002).

Em relação ao agronegócio, a irrigação hoje em dia está inserida num contexto de agricultura irrigada, sendo estratégia que busca o aumento da produção, produtividade e rentabilidade da propriedade agrícola de forma sustentável, com preservação do meio ambiente e manutenção do homem no campo (MANTOVANI et al., 2007). Essa operação possibilita estabilidade para a produção de alimentos, ainda que as adversidades meteorológicas sejam inevitáveis (PEREIRA et al., 2002).

Para manter adequado nível de água no solo a irrigação fornece água onde ela é deficiente e a drenagem retira o seu excesso (ASAWA, 2008). A irrigação e a drenagem auxiliam a manutenção da umidade do solo na região da raiz dentro do intervalo necessário para a produção máxima (ASAWA, 2008). Mas devido ao volume de água necessário, é preciso fazer uso de sistemas de irrigação que possibilitem alta eficiência do uso da água (MANTOVANI et al., 2007). O sistema de irrigação utilizado deve aplicar água uniformemente para que cada parcela da área irrigada receba quantidades parecidas de água durante as irrigações (PATEL e RAJPUT, 2007).

O conhecimento da qualidade da irrigação é fundamental para se evitarem prejuízos financeiros e de degradação física, química e biológica do sistema solo-planta em áreas de alto investimento tecnológico, podendo ser avaliada pelo conhecimento da sua efetividade e da eficiência do uso da água pelas plantas (SAAD e LIBARDI, 1994). O termo efetividade da irrigação, segundo FRIZZONE (1992), descreve qualitativamente a eficiência de aplicação, a uniformidade de distribuição e a eficiência de armazenagem da água no solo. A qualidade da irrigação depende conseqüentemente, tanto dos fatores que envolvem o desempenho do equipamento de irrigação, como dos fatores associados ao controle da irrigação. Estes últimos estão diretamente relacionados às características genéticas da planta, às propriedades físico-hídricas do solo e às condições climáticas locais (SAAD e LIBARDI, 1994).

A importância da irrigação está relacionada às seguintes vantagens: seguro contra as secas, maior produtividade das culturas, melhor qualidade do produto colhido, possibilidade de um programa de cultivo em que as colheitas são realizadas fora da época tradicional, maior eficiência de uso de fertilizantes e introdução de culturas mais caras (MANTOVANI et al., 2007). Dessa forma, o uso da irrigação passou de simples práticas de aplicação de água na agricultura para um importante instrumento de otimização da produção, produtividade e rentabilidade da propriedade rural (MANTOVANI et al., 2007).

3.9.1 Irrigação do feijoeiro

O manejo adequado da cultura do feijoeiro pode trazer benefícios tanto para o meio ambiente como para o rendimento da cultura. Dentre as técnicas de manejo recomendadas para a cultura, a irrigação apresenta grande destaque (PACHECO et al., 2012).

Dentre as técnicas de manejo da irrigação, destacam-se o monitoramento do teor de água no solo com o uso de tensiômetro e/ou reflectometria, sendo estes de difícil utilização para o agricultor, e a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c), que necessita da evapotranspiração de referência (ET_0) e do coeficiente de cultura (K_c) (BERNARDO et al., 2006).

O feijoeiro é uma cultura de grande risco quanto a disponibilidade de água, tornando-se cada vez mais importante a tecnificação da produção, como a irrigação,

que torna a oferta mais constante ao longo do ano e reduz os riscos associados à atividade agrícola (FIGUEIREDO et al., 2007). Além disso, a produção de feijão irrigado é mais alta, quando comparada à produção de feijão não irrigado (cultivado em período chuvoso) (AZEVEDO e CAIXETA, 1986).

Na maioria das regiões produtoras, o problema da baixa produtividade está relacionado à tecnologia rudimentar utilizada e às variações climáticas (PESSOA et al., 1996). Um dos principais problemas é a deficiência hídrica (PESSOA et al., 1996), quando ocorre na fase vegetativa (STONE e MOREIRA, 2001) em função da redução da área de assimilação que comprometerá a fase de enchimento de grãos (GUIMARÃES et al., 1996).

Particularmente em regiões em que durante uma parte do ano os regimes de temperatura e de radiação solar são suficientes para assegurar a produção de culturas agrícolas. Porém deficiências hídricas preponderantes nas regiões Norte, Nordeste e Noroeste do Estado de São Paulo justificam a adoção de técnicas conjugadas de plantio direto e de irrigação. Estas técnicas têm se mostrado promissoras tanto sob o ponto de vista de melhoria da exploração da terra e de insumos e como também sob o aspecto conservacionista (PAVANI et al., 2009). Na região Central do Brasil, a semeadura direta do feijoeiro irrigado por aspersão na resteva da cultura anterior, vem tendo aceitação cada vez maior por ser uma alternativa de manejo correto e sustentável de sistemas agrícolas intensivos (STONE e SILVEIRA, 1999).

No Paraná o seu zoneamento agrícola demonstra que a semeadura do feijão de terceira safra para a região noroeste deve-se concentrar principalmente nos meses de fevereiro e março (MAPA, 2010). No entanto, devido à baixa capacidade de armazenamento hídrico dos solos da região (GOMES et al., 2010), isto deve ser feito com uso do plantio direto e/ou irrigação (CARAMORI et al., 2003).

Dessa forma, a irrigação praticada de forma suplementar pode se tornar uma opção de garantia de safra, mas o inconstante mercado agrícola e o considerável investimento inicial na aquisição de equipamentos de irrigação têm dificultado à expansão da agricultura irrigada na região (GOMES et al. 2012).

3.9.2 Irrigação Localizada: Gotejamento

No sistema de irrigação localizada, a água é aplicada diretamente na região radicular em pequenas intensidades e alta frequência, mantendo o solo próximo a capacidade de campo (MANTOVANI et al., 2007). Os dois principais sistemas de irrigação localizada são gotejamento e microaspersão, sendo que nestes sistemas a água se distribui por uma rede de tubos, sob baixa pressão (MANTOVANI et al., 2007). Os emissores são fixos nas tubulações dispostas na superfície do solo ou enterradas, acompanhando as linhas de plantio (MANTOVANI et al., 2007).

O sistema de irrigação localizada por gotejamento consiste em emissores, que são enterrados ou colocados sobre a superfície do solo para o fornecimento de água em uma taxa controlada (PATEL e RAJPUT, 2007). Apresenta maior eficiência de aplicação e controle, automação total e fertirrigação, requerendo menor demanda de energia e de mão-de-obra (GARCIA, 2003), além de uma distribuição uniforme de água através dos seus emissores (ZHANG et al., 2013). Porém, a sua eficiência é dependente do conhecimento e do estudo de vários fatores, tais como o manejo da irrigação, associado ao manejo do sistema solo-planta-atmosfera (LEMOS et al., 2012). Esse sistema é composto por emissores denominados de gotejadores, através dos quais a água flui é aplicada (MANTOVANI et al., 2007).

A frequência de irrigação pelo método de gotejamento é um dos aspectos de maior importância a ser considerado em estudos voltados ao manejo racional da irrigação em localidades onde esta prática agrícola é essencial (WANG et al., 2006). Devido às diferenças de umidade do solo e padrão de molhamento, o rendimento das culturas pode ser diferente quando a mesma quantidade de água é aplicada sob diferentes frequências de irrigação (WANG et al., 2006). Altas frequências de irrigação por gotejamento podem fornecer condições desejáveis para o movimento de água no solo e sua absorção pelas raízes (SEGAL et al., 2000).

3.9.3 Controle de Irrigação

Apesar do uso de sistemas mais eficientes, frequentemente irrigações excessivas têm sido o fator que mais contribui para o insucesso da exploração agrícola (SILVA et al., 2002). Desta maneira, existe demanda crescente pela implantação de sistemas de controle de irrigação que permitam melhor

gerenciamento dos recursos utilizados e pela otimização do uso de água na agricultura. A adoção deste controle afeta de forma positiva a produção agrícola irrigada, reduzindo o desperdício, a lixiviação de nutrientes e a incidência de doenças, devido ao menor tempo de exposição da folha ao molhamento, dentre outros (GARCIA, 2003).

O conhecimento da umidade do solo é importante, pois demonstra em quais condições o mesmo se encontra (MANTOVANI et al., 2007). Dessa forma, a umidade do solo deve ser avaliada para que a quantidade de água a ser aplicada no sistema agrícola possa ser determinada com precisão (MANTOVANI et al., 2007). Tanto as irrigações deficientes como as irrigações excessivas resultam em baixas produtividades, pois afetam a fotossíntese e outros processos morfofisiológicos que governam o crescimento e o desenvolvimento das plantas (PEREIRA et al., 2002).

Irrigações excessivas degradam a qualidade do solo, causam lixiviações de nutrientes essenciais disponíveis às plantas, prejudicam a aeração do solo, podem reduzir o crescimento das plantas e ocasionar alagamentos (PEREIRA et al., 2002; MAVI e TUPPER, 2004), além de implicar em aumento na incidência de doenças em campos de produção (PATEL e RAJPUT, 2007). Entretanto, planejamento de irrigação ainda não é utilizado pela maioria dos agricultores por falta de conhecimentos pertinentes a sua adoção e benefícios a serem obtidos. A adoção de práticas de manejo adequadas em propriedades rurais resulta em aumento de rendimentos biológicos e maior rentabilidade (MAVI e TUPPER, 2004).

3.10 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DAS CULTURAS

A evapotranspiração, considerada como um dos principais componentes do ciclo hidrológico (ENKU e MELESSE, 2014), ocorre simultaneamente através da transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e por transpiração das plantas, não havendo nenhuma maneira fácil de distinguir esses dois processos (PEREIRA et al., 2002; COBANER, 2011). Os dois processos ocorrem basicamente de forma simultânea, envolvendo mudança do estado líquido para o de vapor (MAVI e TUPPER, 2004) e disponibilidade de água do solo. A taxa de evapotranspiração das culturas é influenciada principalmente pelas condições meteorológicas como radiação solar, temperatura, vento, umidade relativa do ar, chuva e pressão atmosférica (PEREIRA et al., 2002; MAVI e TUPPER, 2004). De

acordo com as condições de vegetação, tamanho da área com vegetação e o suprimento de água no solo, define-se situações bem características, tais como evapotranspiração potencial, real, de oásis, e de cultura (PEREIRA et al., 2002).

A demanda evaporativa da atmosfera é o fator que, em última instância, causa o fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera. Esse fator é responsável pela magnitude da perda de água por evapotranspiração e, portanto, pela quantidade de água que as plantas necessitam absorver. Esta quantidade, na ausência da precipitação pluvial, deve ser suprida pela irrigação. Dessa maneira, o conhecimento da evapotranspiração das culturas é importante para adoção das práticas agrícolas, bem como atividades de planejamento e manejo do suprimento de água na agricultura irrigada (STONE e SILVEIRA, 1995).

A medição da evapotranspiração das culturas sob condições de campo constitui procedimento de grande importância na gestão atual e futura dos recursos hídricos, com vistas à proposição de soluções a muitos problemas relacionados à hidrologia, meteorologia e ecologia de ecossistemas agrícolas, tanto a âmbito nacional como também internacional (MAVI e TUPPER, 2004; TIAN et al., 2013). Para o planejamento de um sistema de irrigação, deve-se conhecer com precisão as taxas de evapotranspiração para que se possa quantificar a lâmina ideal de água a ser aplicada no momento certo ao longo de toda estação de crescimento das plantas, de modo a se assegurar a expressão da potencialidade produtiva da espécie vegetal em estudo a ser cultivada em determinada região (MAVI e TUPPER, 2004).

Para se obter a evapotranspiração de uma cultura (ET_c), muitos trabalhos foram realizados, comparando-se valores de evapotranspiração de culturas com a demanda potencial sob diferentes condições de clima e solo. Dessa forma, foram determinados coeficientes de cultura (K_c) que variam com a cultura, estágio de desenvolvimento, velocidade do vento e umidade (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

De acordo com a FAO, a estimativa indireta da ET_c pode ser dividida em duas etapas: estimar a ET_0 a partir de dados meteorológicos locais por meio de uma fórmula empírica e avaliar a evapotranspiração associada com o crescimento da cultura, multiplicando-se a ET_0 por um fator que expresse a área foliar: o coeficiente de cultura (KUO et al., 2011).

Wright (1982) propôs coeficientes de cultura melhorados para várias culturas irrigadas do noroeste do Pacífico, tais como alfafa, batata, feijão, beterraba, ervilha,

milho doce, milho cultivado e cereais de inverno e de primavera, a partir de medidas da ET_0 em lisímetros de pesagem realizadas em campo experimental próximo a Kimberly, Idaho. Os novos coeficientes propostos pelo autor referem-se a coeficientes mínimos ou basais obtidos nas condições de evaporação mínima do solo e com umidade do solo adequada na zona radicular da cultura e podem permitir a obtenção de estimativas mais precisas da evapotranspiração diária da cultura, sistematização mais consistente da irrigação e estimativas mais confiáveis das exigências hídricas das culturas.

Os modelos de estimação aplicam regressão estatística para estimar a evapotranspiração com dados meteorológicos como temperatura do ar e do solo e radiação líquida (YAN et al., 2012). Várias fórmulas empíricas têm sido propostas internacionalmente para estimar a relação não linear entre o regime das taxas de ET_0 e idade fisiológica das culturas. Para estimativa da demanda evaporativa da atmosfera fórmulas empíricas assim como modelos matemáticos podem ser empregados, como exemplos: o Método de Blaney-Criddle, o Método da Radiação Solar, o Método de Penman-Monteith-FAO 56 e o Método de Evaporação de Tanque Classe A. São utilizados os seguintes dados: temperaturas extremas, velocidade do vento, número de horas de luz, umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, etc. (KURO et al., 2011). O método Penman-Monteith é o único aceito globalmente, tendo bom desempenho sob várias condições climáticas no mundo (ENKUN e MELESSE, 2014).

3.11 EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ESTUFAS DE PLÁSTICO

A cobertura plástica utilizada em estufas é responsável pela alteração significativa no balanço de radiação que ocorre em seu interior. Isso se deve à atenuação (absorção e reflexão) da radiação solar incidente pela cobertura, o que resulta em redução no saldo de radiação interno e, dessa forma, na evapotranspiração (PEREIRA et al., 2002). O ambiente protegido é responsável pelas alterações meteorológicas que ocorrem no seu interior, sendo possível ajustar as exigências térmicas, hídricas e fotoperiódicas das plantas ao ambiente modificado, o que possibilita estender o período de produção das culturas em épocas do ano e mesmo em regiões antes consideradas inaptas à agricultura (ANDRIOLO, 1999), ou seja, os cultivos na entressafra (ARAÚJO et al., 2009).

Basicamente, o que ocorre dentro da estufa é a redução das variações extremas dos elementos meteorológicos desfavoráveis a essas culturas no ambiente externo (VASQUÉZ et al., 2005). Dentro da estufa se forma um microclima que, geralmente, atua na redução da evapotranspiração que pode ser de até 70% daquela observada sob céu aberto (DALMAGO et al., 2006). Assim, o ambiente protegido afeta o consumo de água das plantas, sendo necessário reformular o manejo da irrigação nesse ambiente em que a precipitação é ausente e toda a água necessária para o desenvolvimento das plantas precisa ser fornecida artificialmente, sendo, portanto, possível o controle da água ao longo da estação de crescimento da cultura (PIVETTA et al., 2010).

3.12 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO FEIJOEIRO

O solo é fortemente caracterizado pelos seus atributos físicos, os quais determinam o potencial de uso da terra (FERNÁNDEZ-UGALDE et al., 2009), desempenhando papel importante no desenvolvimento das plantas (BASSO et al., 2011). O estudo dos atributos físicos do solo ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e duração das alterações devido a diferentes sistemas de manejo (SILVEIRA et al., 2011).

A textura quantifica a distribuição relativa das partículas minerais do solo, os quais são caracterizados em termo de seu diâmetro equivalente. Essas partículas são denominadas de areia, silte e argila (RESENDE et al., 2007; KLEIN, 2008). A textura do solo tem grande influência no manejo da irrigação, pois relaciona a capacidade de retenção de água a sua permeabilidade. Os solos com elevados teores de argila, em geral apresentam uma faixa mais ampla de umidade, enquanto que a dos arenosos é bem mais estreita (KITAMURA et al., 2007).

A porosidade do solo influencia na aeração, condução e retenção de água, resistência à penetração e desenvolvimento do sistema radicular no perfil do solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis às plantas (TOGNON, 1991). Um solo com maior macroporosidade oferecerá menor impedimento ao desenvolvimento das raízes, por permitir que elas contornem as zonas de alta impedância mecânica (GLINSKI e LIPIEC, 1990; LIPIEC e HATANO, 2003). Montanari et al. (2013), em estudo conduzido no campo, obtiveram em Latossolo correlação significativa entre a produtividade de feijão e a porosidade total

do solo na camada de 0 a 10 cm ($r = 0,200^*$). Basso et al. (2011), também sob condições de campo, obtiveram correlação significativa entre a porosidade total do solo na camada de 0 a 10 cm e a produtividade de matéria fresca e seca de sorgo, tendo sido seus respectivos valores de coeficiente de correlação de Pearson equivalentes a $0,168^{**}$ e $0,197^{**}$.

A densidade do solo constitui um dos atributos físicos que apresenta maior destaque na influência do solo sobre a produtividade das culturas (MELO FILHO et al., 2006). Esse atributo físico está relacionado a outros como macroporosidade, microporosidade, porosidade total, infiltração e condutividade hidráulica do solo (SILVA et al., 1986). A densidade de partículas é atributo pouco utilizado em pesquisas voltadas ao manejo do solo, devido a seu caráter imutável diante da ação antrópica que o preparo do solo desencadeia (CAMARGO e ALLEONI, 1997). Montanari et al. (2013) obtiveram correlação significativa entre a produtividade de feijão e densidade do solo na camada de 0 a 10 cm ($r = -0,187^*$). Basso et al. (2011) obtiveram correlação significativa entre a densidade do solo na camada de 0 a 10 cm e a produtividade de matéria fresca e seca de sorgo, sendo os seus respectivos valores $-0,218^{**}$ e $-0,242^{**}$.

A porosidade total e a densidade do solo são atributos físicos que refletem qualitativamente a estrutura do solo (CÁSSARO et al., 2011). Montanari et al. (2013) obtiveram para cada camada de solo correlação significativa entre a densidade do solo e a porosidade total. Os valores de r foram de $-0,785^{**}$ para a camada de 0 a 10 cm, de $-0,749^{**}$ para a camada de 10 a 20 cm e de $-0,664^{**}$ para a camada de 20 a 30 cm.

A condutividade hidráulica é um atributo físico do solo que influencia o movimento da água nesse meio poroso (GONÇALVES e LIBARDI, 2013). É de grande relevância em estudos agrônômicos, pois está diretamente relacionada com a produção agrícola e à preservação do solo e do ambiente (GONÇALVES e LIBARDI, 2013). Assim, o estudo do conteúdo e do movimento da água no solo é de grande importância agrícola para que a máxima capacidade de infiltração e de armazenamento de água no solo proveniente do regime de chuvas ou da prática de irrigação seja possível de ser determinada (CARVALHO e LIBARDI, 2010).

A condutividade hidráulica saturada do solo (K_0) representa um atributo físico de extrema importância para análise da intensidade do deslocamento da água no solo (MARQUES et al., 2008). Em particular, K_0 é um dos atributos físicos do solo de

maior variabilidade que reflete o processo de infiltração da água no solo (JAČKA et al., 2016), apresentando grande importância na caracterização do fluxo de água em direção aos drenos (QUEIROZ et al., 1997). Dessa forma, K_0 é essencial para diagnosticar problemas relativos a manejo de solo e água com impactos ecológicos, agrícolas e ambientais (YAO et al., 2015).

A curva de retenção de água (CRA) representa um atributo muito importante para estudos físico-hídricos do solo, sendo expressa pela relação entre o potencial mátrico da água (Ψ_m) e a umidade do solo a base de massa (U) ou volume (θ) (REINERT E REICHERT, 2006; DAVALO, 2013). A CRA é um indicador muito importante de qualidade física do solo, a qual está diretamente relacionada com o desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 2010; DEBNATH et al., 2012).

Com a CRA é possível proceder-se a determinação de atributos físicos do solo, tais como a porosidade drenável, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente, a quantidade de água disponível para as plantas, a condutividade hidráulica não-saturada, o balanço hídrico, determinando-se assim a variação de armazenamento de água no solo (CENTURION e ANDRIOLI, 2000), a qual condiciona sobremaneira o crescimento e o desenvolvimento das plantas superiores, tanto em campos de produção como em ambientes controlados.

A CRA é geralmente medida experimentalmente, não existindo uma teoria satisfatória para sua previsão (GRIGOLON, 2013). Após sua determinação, equações matemáticas são utilizadas em seu ajuste. Uma equação bastante empregada é a de van Genuchten (1980). Esse modelo apresenta como característica a presença de duas assíntotas, relacionadas aos conteúdos de água no solo correspondentes à saturação (θ_s) e ao conteúdo residual (θ_r), bem como um ponto de inflexão entre esses pontos, o qual é dependente dos atributos físicos do solo, sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (" α ", " n " e " m ") (CARDUCCI et al., 2011).

A distribuição do tamanho de poros é útil e possibilita a caracterização do sistema poroso e o entendimento do armazenamento, movimento de água e crescimento das raízes no perfil do solo (LIPIEC et al., 2006) e em associação a sua continuidade controla os processos de infiltração e retenção de água (KUTÍLEK e NIELSEN, 1994; HILLEL, 1998). Com a transformação dos dados da CRA em função de $d\Psi_m d\theta^{-1}$, obtém-se a curva de distribuição de poros (CDP) (KASTANEK

e NIELSEN, 2001). Na análise da CDP o valor do potencial mátrico é geralmente substituído pelo valor do raio do poro.

Poros de tamanhos diferentes apresentam funções distintas no solo. Poros com diâmetro equivalente maior e menor que 50 μm são classificados como poros de transmissão e poros ligantes residuais, respectivamente. O primeiro é responsável pela circulação de ar e drenagem de excesso de água e o segundo pela retenção e difusão e retenção de íons na solução do solo. Os poros de tamanho intermediário são responsáveis pela retenção e liberação de água (LAL e SHUKLA, 2004). O uso da distribuição do tamanho de poros para caracterizar mudanças na estrutura do solo por diferentes fenômenos está se tornando cada vez mais comum no estudo da ciência do solo (CÁSSARO et al., 2011; DAL FERRO et al., 2014).

Pires et al. (2017) obtiveram diferenças na estrutura do solo em três camadas (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) sob dois sistemas de cultivo (plantio convencional e plantio direto). No sistema de plantio convencional foram encontradas maiores diferenças entre as camadas, quanto à distribuição de poros. No sistema plantio direto as diferenças quanto a este fator são menores. Devido ao revolvimento do solo a camada superficial do plantio convencional apresenta uma maior porosidade total e um incremento na macroporosidade pela desagregação dos microagregados.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL, CLIMA E SOLO

O experimento (Figura 1) foi instalado e conduzido em casa de vegetação pertencente ao Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná. As coordenadas geográficas da localidade estudada são 25° 5' 40" de latitude sul e 50° 9' 48" de longitude oeste, apresentando altitude média de 956 m em relação ao nível do mar.



Figura 1 – Visualização das plantas de feijoeiro dispostas em canteiros em ambiente protegido.
Fonte: O autor

O município de Ponta Grossa apresenta segundo a classificação de Köppen e Geiger a fórmula climática Cfb, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C, com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22 °C e sem estação seca definida (IAPAR, 2016a). A pluviosidade média anual varia de 1600 a 1800 mm, sendo o mês de Agosto o mais seco e o de Fevereiro o mais chuvoso (IAPAR, 2016b).

A casa de vegetação da marca Van der Hoeven é constituída de uma estrutura metálica coberta por polietileno de alta densidade apresentando formato tipo capela. Apresenta dimensão de 11 x 7m, sendo constituída por um ventilador, uma bomba de água e um ventilador de aquecimento. Na casa de vegetação existia um sensor DHT11 conectado a uma placa arduino destinado a coleta de dados de temperatura e umidade relativa a cada dois minutos.

O solo utilizado para implantação e condução da cultura foi um Latossolo Vermelho distrófico, com textura argilosa. O solo foi coletado da camada de 0 a 20 cm, de uma área experimental submetida a gradagem e a aração.

Na Tabela 1 tem-se o resultado da análise química do solo para cálculo da quantidade de fertilizantes a ser aplicada, bem como verificar se havia necessidade de corrigir o pH do solo mediante a prática da calagem.

Tabela 1 – Atributos químicos e granulométricos do solo antes da instalação do experimento.

pH	H+Al	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC _(pH 7,0)
----- cmol _c dm ⁻³ -----						
4,9	6,69	0,1	5,1	1,8	0,48	14,07
P	CO	Areia	Silte	Argila	V	m
----- mg dm ⁻³ ----- g kg ⁻¹ ----- % -----						
7,8	30	158	302	540	52,5	1,3

pH = potencial hidrogeniônico em CaCl₂; H+Al = acidez potencial; Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ = alumínio, cálcio, magnésio e potássio trocáveis, respectivamente; CTC_(pH 7,0) = capacidade de troca de cátions potencial; P = fósforo disponível (Melich⁻¹); CO = carbono orgânico (Walkley-Black); V e m = saturação por bases e por alumínio, respectivamente.

4.2 CONDUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O trabalho foi conduzido em oito canteiros de madeira com solo peneirado em malha de 8 mm, a fim de separá-lo de torrões, restos culturais e outros detritos. Os canteiros de madeira apresentavam dimensões de 2,50 x 1,25 m, possuindo cada um deles 6 linhas de semeadura e 12 plantas por linha (Figura 2). O espaçamento entre linhas foi de 40 cm e o número de plantas por metro linear foi de 10. Utilizou-se o sistema de irrigação localizada por gotejamento. Cada linha de semeadura continha uma fita de gotejamento, colocada a 5 cm de distância. A fita de gotejamento continha oito gotejadores espaçados de 15 cm entre si, sendo que cada gotejador possuía vazão máxima de 1,4 L h⁻¹.

A cultura foi semeada em 10/03/2016 de forma manual com duas sementes por cova. Após a emissão do primeiro trifólio, realizou-se o desbaste deixando-se

apenas uma planta por cova. A correção do solo para a acidez através da calagem não foi necessária. A adubação foi realizada na semeadura com 19,5 g por linha (374,4 kg ha⁻¹) da formulação NPK 4-14-8, baseado na recomendação de IAPAR, 2003. Posteriormente aos 25 dias após a emergência das plantas efetuou-se adubação nitrogenada de cobertura, aplicando-se 7 g de uréia por linha (134,4 kg ha⁻¹), com base na recomendação de IAPAR, 2003.

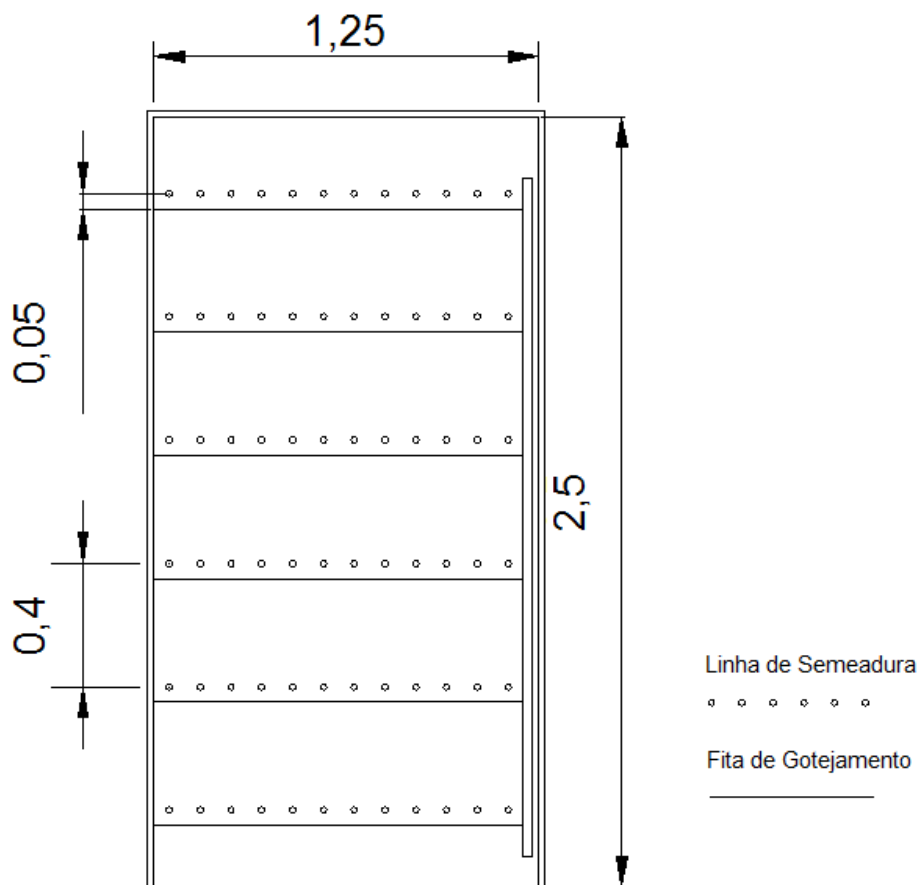


Figura 2 – Detalhamento esquemático e dimensional (m) de um dos canteiros utilizado com a cultura do feijoeiro em ambiente protegido.

Fonte – O autor.

Antes da semeadura as sementes foram tratadas para o controle de pragas e doenças de solo. No transcorrer do desenvolvimento das plantas realizou-se tratamento fitossanitário para controle de mosca branca e ácaro branco. O controle das plantas daninhas foi realizado de forma manual até o fechamento da cultura entre linhas pela cobertura vegetal.

A colheita foi realizada no dia 31/05/2016, após a cultura finalizar o processo de maturação fisiológica. Após as plantas passarem pelo processo de secagem

procedeu-se a avaliação dos componentes de rendimento do feijoeiro. O resumo do ciclo de crescimento e desenvolvimento da cultura está descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização do crescimento e desenvolvimento da cultura do feijoeiro sob condição de ambiente protegido.

Dias após a Emergência (DAE)	Estádio de crescimento e desenvolvimento
1 - 26	Vegetativo
26 - 43	Floração
43 - 63	Enchimento de grãos
63 - 77	Maturação

4.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, TRATAMENTOS E CULTIVOS

O experimento foi conduzido sob delineamento inteiramente casualizado, com tratamentos em arranjo fatorial (2 x 4), com seis repetições para os componentes de rendimento da cultura e quatro repetições para os atributos físicos do solo e parâmetros ecofisiológicos das plantas.

Para a análise de componentes de rendimento foi considerada uma planta como uma repetição. As plantas utilizadas para essa análise foram das duas linhas centrais das unidades experimentais. Com o intuito de se evitar a obtenção de resultados tendenciosos, utilizaram-se as plantas das posições 4, 6 e 8 em relação ao início da fita de gotejamento para as avaliações. Para as análises ecofisiológicas foram utilizadas as plantas das linhas localizadas externamente ao lado das linhas centrais. As duas linhas localizadas na extremidade dos canteiros e as plantas das posições 1, 2, 11 e 12 em relação ao início da fita de gotejamento constituíram a bordadura.

Os tratamentos se referem à combinação de dois cultivares de feijão (Tuiuiú e Campos Gerais) e quatro níveis de umidade do solo (14, 21, 28, 35% da umidade volumétrica). Os tratamentos de irrigação foram aplicados 16 dias após a emergência das plântulas. A irrigação foi efetuada com base nas medições diárias do conteúdo de água do solo por intermédio de um Time Domain Reflectometer (TDR) portátil, da marca Hydrosense, de forma a manter a umidade do solo dentro dos limites desejados para cada tratamento. Antes da aplicação dos tratamentos de irrigação, todos os canteiros receberam a mesma lâmina de água, próxima a capacidade de campo. O TDR apresentava espaçamento de 3 cm entre hastes, tendo sido utilizadas hastes de 12 cm de comprimento no início da diferenciação dos

tratamentos de suprimento de água e 15 dias depois hastes de 20 cm de comprimento.

4.4 VARIÁVEIS DAS PLANTAS AVALIADAS

4.4.1 Componentes de Rendimento

Após a colheita foram avaliados os seguintes componentes de rendimento: número de vagens por planta, número de grãos por vagem, massa de grãos por planta e massa de cem sementes.

O número de vagens por planta (NVP) foi determinado para cada planta, separando-se as vagens viáveis das não viáveis. Foi considerada vagem viável aquela que produziu pelo menos um grão. O número de grãos por vagem (NGV) foi obtido pela razão entre o número de grãos produzido por uma dada planta e o número de vagens dessa mesma planta.

Para a determinação da massa de grãos por planta (MGP), fez-se uso de balança de precisão da marca Gehaka, modelo BG 4000, com um desvio de 0,01 g e erro de 0,1 g. Em seguida foi determinada a umidade com o medidor de umidade de grãos, marca Farmex MT-PRO. Com a umidade obtida, a massa de grãos foi corrigida para 13% de umidade em peso (Equação 1).

A massa de cem sementes (MCG) foi determinada através da equação 2, após ter sido considerado o fator de correção para umidade.

$$MGP = \frac{PG-13}{100-13} \cdot mg \quad (1)$$

na qual:

MGP = massa de grãos por planta corrigida a 13% de umidade em peso (%);

PG = percentual de umidade do grão medido (%);

mg = massa de grãos (g);

$$MCG = \frac{MGP \cdot 100}{NG} \quad (2)$$

na qual:

MCG = massa de cem grãos (g);

NG = número grãos

4.4.2 Parâmetros Ecofisiológicos

Após aplicação dos níveis de irrigação, os parâmetros ecofisiológicos foram avaliados por intermédio do aparelho portátil, da marca LI-COR modelo 6400-XT, denominado IRGA (Infrared Gas Analyser – Analisador Infravermelho de Gases). A análise foi realizada com medição no folíolo central do terceiro trifólio de quatro plantas escolhidas de forma aleatória para cada tratamento.

As avaliações foram realizadas, preferencialmente, no intervalo entre 13:30 e 15:00 horas, com o intuito de se obter a menor interferência possível das nuvens sobre a incidência dos raios solares, o que poderia prejudicar as interpretações dos resultados a serem obtidos a partir dessas análises. Somente a partir do mês de abril de 2016 iniciou-se a realização dessas avaliações, ocasião que culminou com a definição dos tratamentos de nível de água no solo propostos neste estudo. No mês de maio não se efetuou avaliação dos parâmetros ecofisiológicos por ter havido preponderância de dias nublados e chuvosos, o que impossibilitou o emprego do IRGA em decorrência de tais condições climáticas.

O folíolo foi posicionado internamente no sensor óptico durante as leituras. Os parâmetros ecofisiológicos medidos pelo IRGA, da marca LI-COR modelo 6400-XT, foram: fotossíntese líquida (FL, $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (CE, $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração de carbono intercelular (Ci, $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$), Transpiração (Tr, $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). A eficiência fotossintética do uso da água (EUA, $[(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}]$) foi calculada pela equação 3 e a eficiência de carboxilação (ECi, $[(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}]$) foi obtida através da equação 4.

$$\text{EUA} = \frac{\text{FL}}{\text{Tr}} \quad (3)$$

$$\text{ECi} = \frac{\text{FL}}{\text{Ci}} \quad (4)$$

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

No final do ciclo da cultura procedeu-se a coleta de quatro amostras de solo por tratamento ao lado da linha da cultura, em uma profundidade média de 7,5 cm. A coleta das amostras foi realizada com o auxílio de anéis volumétricos em aço inox com volume aproximado de 62,8 cm³ (4 x 5 cm – respectivamente, diâmetro interno e altura). Após a coleta as amostras foram envoltas em filme plástico para posterior preparo em laboratório.

Após serem preparadas, as amostras foram saturadas pelo processo de ascensão capilar (KLUTE, 1986). Depois da saturação, aplicaram-se os seguintes valores de Ψ_m : -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80, -90 e -100 cm de H₂O em mesa de tensão (modelo M-0801, Heijkamp®). As curvas de retenção de água foram ajustadas pela equação de van Genuchten (1980) (Equação 5), com a aproximação de Mualem (1986) (Equação 6). O programa SRWC FIT (SEKI, 2007) foi utilizado no ajuste. Por meio da primeira derivada da Curva de Retenção de Água (CRA) foi obtida a Curva de Distribuição de Poros (CDP) via Função Capacidade de Água (FCA) (Equação 7).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot H)^n]^m}, \quad (5)$$

em que:

θ = umidade à base de volume (cm³ cm⁻³);

θ_r = umidade residual (cm³ cm⁻³);

θ_s = umidade de saturação (cm³ cm⁻³);

H = tensão em coluna de água (cm);

α , n , m = parâmetros empíricos de ajuste do modelo

sendo:

$$m = 1 - \left(\frac{1}{n}\right), \quad (6)$$

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r) \cdot m \cdot n \cdot \alpha \cdot (\alpha \cdot h)^{n-1}}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^{m+1}}, \quad (7)$$

A análise de textura do solo foi realizada utilizando-se o método da pipeta (EMBRAPA, 1997). A densidade do solo (DS) foi obtida pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). A densidade de partículas (DP) foi determinada pelo método de picnometria convencional (EMBRAPA, 1997). A determinação da porosidade total (PT) foi obtida pela equação 8 (DANE et al., 2002). A microporosidade (MI) foi calculada pelo conteúdo de água retido no solo para o valor de Ψ_m igual a -60 cm de H_2O de coluna d'água (aproximadamente um raio equivalente de poro de $25 \mu m$) (EMBRAPA, 1997). A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a PT e a MI (EMBRAPA, 1997). A condutividade hidráulica saturada do solo (K_0) foi determinada em amostras saturadas através da metodologia do permeâmetro de carga constante (EMBRAPA, 1997), utilizando o frasco de Mariotte para manter um fluxo uniforme de água.

$$P_t = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right), \quad (8)$$

4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F. As pressuposições de normalidade dos dados experimentais foram verificadas pelo teste de Shapiro-Wilk ($P < 0,05$). Quando não foi constatada a normalidade dos dados, estes foram transformados pelo fator de transformação Box-Cox, expresso pela equação 9. Nos casos de valor de F significativo ($P < 0,05$), foi aplicado o teste de comparação de médias S-N-K (Student-Newman-Keuls) ($0,05$) para comparar o desempenho de dois cultivares de feijoeiro, bem como a análise de regressão para quantificar o efeito dos diferentes níveis de umidade do solo sobre as variáveis respostas medidas no experimento conduzido em ambiente protegido. Na ocorrência de interações entre os fatores em estudo, estas foram desmembradas. As análises estatísticas foram realizadas através do *software* Assistat 7.7. O esquema da análise de variância pode ser visualizado nas Tabelas 3 e 4.

$$Y_i(\lambda) = \begin{cases} \ln(X_i), & \text{se } \lambda = 0, \\ \frac{X_i^\lambda - 1}{\lambda}, & \text{se } \lambda \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

em que:

X_i = dados originais;

λ = parâmetro de transformação;

Y_i = valor transformado

Tabela 3 – Esquema da análise de variância para os componentes de rendimento das plantas de feijoeiro cultivadas sob condição de ambiente protegido.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade
Cultivar (C)	1
Níveis de Água no Solo (A)	3
C x A	3
Erro Experimental	40
Total	47

Tabela 4 – Esquema da análise de variância para os parâmetros ecofisiológicos do feijoeiro e para os atributos físicos do solo em ambiente protegido.

Fontes de Variação	Graus de Liberdade
Cultivar (C)	1
Níveis de Água no Solo (A)	3
(C x A)	3
Erro Experimental	24
Total	31

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E FORNECIMENTO DE ÁGUA

Os dados relativos às temperaturas média, mínima e máxima e umidade relativa no interior da casa de vegetação foram obtidos desde o início da aplicação dos tratamentos de níveis de umidade do solo até o final do ciclo da cultura. Na Figura 3 são apresentadas essas temperaturas média, mínima e máxima no interior da casa de vegetação. Pode-se observar que a temperatura média do ar durante o estágio de florescimento foi por volta de 23,9°C. Porém, a temperatura máxima durante esta etapa fenológica da cultura foi superior a 30°C. Na fase de enchimento de grãos a temperatura média foi de 20,7°C, sendo que em todo esse período as temperaturas máximas foram inferiores a 30°C, o que representam níveis energéticos compatíveis às exigências térmicas de espécies vegetais classificadas como plantas de metabolismo C₃ (KERBAUY, 2004).

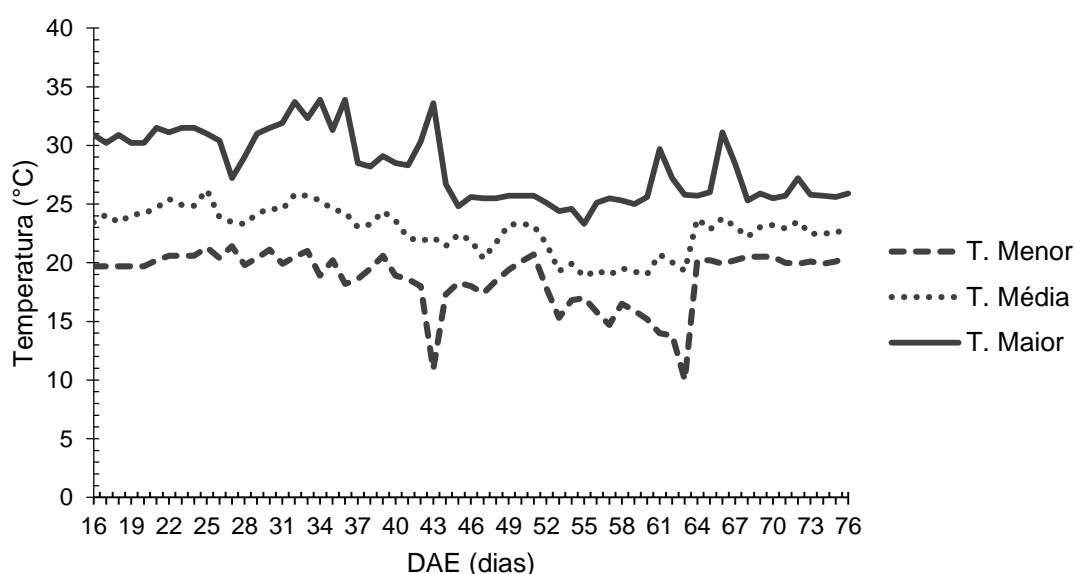


Figura 3 – Regime de temperatura do ar: a) média; b) mínima; c) máxima (°C) do interior da casa de vegetação após a aplicação dos tratamentos de níveis de umidade do solo (dias após a emergência – DAE) durante a estação de crescimento do feijoeiro.

Na Figura 4 são apresentadas as umidades relativa média, mínima e máxima no interior da casa de vegetação. Nota-se que a umidade média durante o estágio de florescimento foi de 68,4%. As umidades mínimas foram inferiores a 65% em quase todo este período e as máximas superiores à 90% em boa parte dessa etapa

fenológica da cultura. Na fase de enchimento de grãos a umidade relativa média foi de 68,4%. Neste estágio a umidade relativa máxima e mínima variaram de 54,1% a 92,1% e 33,2% a 80%, respectivamente. Esses níveis de umidade atmosférica podem afetar as taxas de transpiração através dos estômatos e a fotossíntese das plantas de feijoeiro cultivadas sob condições de ambiente protegido. Quanto maior a umidade relativa do ar, menor será a taxa de transpiração vegetal e menor deverá ser a taxa de assimilação de CO₂ atmosférico, reduzindo-se assim o rendimento biológico das plantas sob tais condições ambientais.

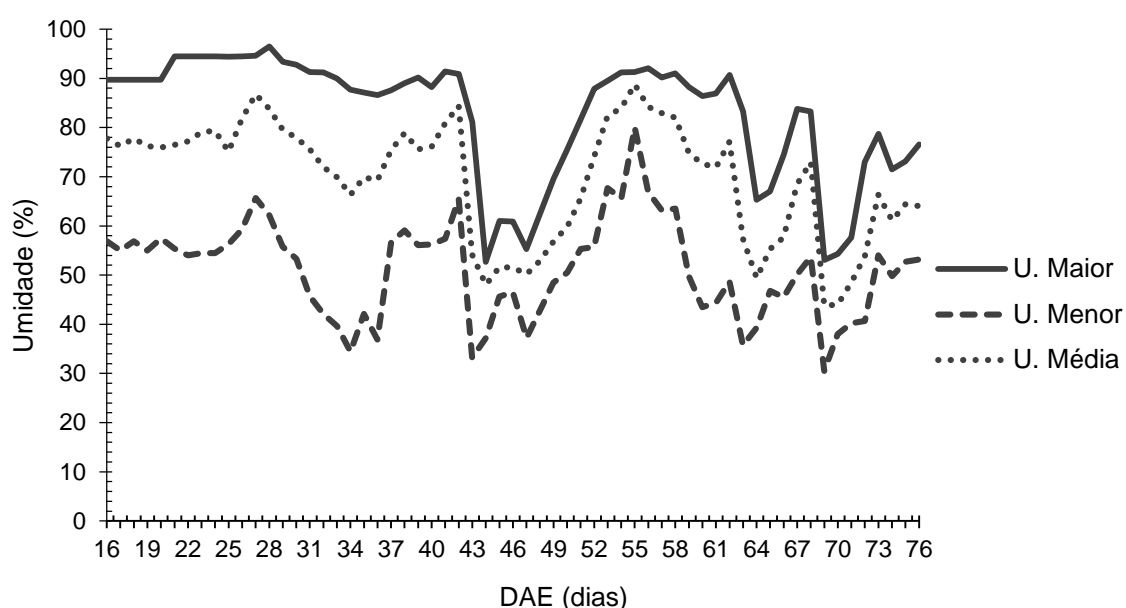


Figura 4 – Regime de umidade relativa do ar: a) média; b) mínima; c) máxima (%) no interior da casa de vegetação após a aplicação dos tratamentos de níveis de umidade do solo (dias após a emergência – DAE durante a estação de crescimento do feijoeiro).

A Figura 5 apresenta a lâmina de água que foi utilizada para cada canteiro antes da aplicação dos tratamentos dos níveis de umidade do solo. Todos os canteiros receberam a mesma quantidade de água durante a fase inicial de desenvolvimento da cultura, sendo que a lâmina total aplicada foi de 66,4 mm durante este período. Após aplicação dos tratamentos de níveis de umidade do solo, cada canteiro recebeu a lâmina de água necessária para manter os níveis de umidade do solo previamente estipulados neste estudo.

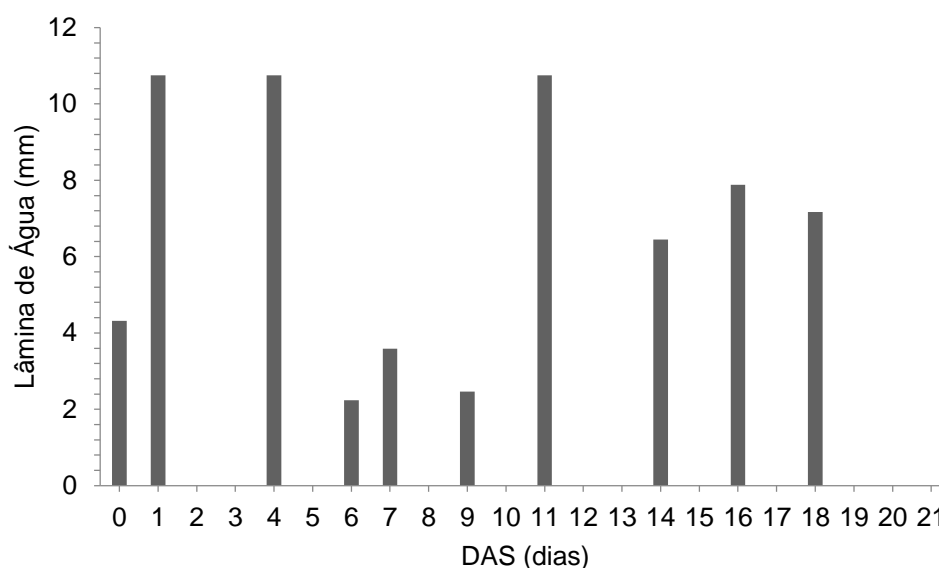


Figura 5 – Valores diários da lâmina de irrigação adotada no período inicial de desenvolvimento das plantas de feijoeiro cultivadas sob condição de ambiente protegido em função de dias após a semeadura - DAS.

A Figura 6 descreve as diferentes lâminas utilizadas após a aplicação dos tratamentos para cada canteiro em função do suprimento de água estabelecido. Nos canteiros destinados ao cultivar Campos Gerais foram aplicadas as seguintes lâminas de água: 216,1; 154,8; 79,6 e 25,1 mm, respectivamente, para 35, 28, 21 e 14% de umidade volumétrica do solo. Nos canteiros onde se cultivou Tuiuiú foram aplicadas sob os quatro diferentes níveis de umidade do solo, considerando-se a ordem decrescente de suprimento hídrico, as lâminas de água de 231,5; 263,4; 113,1 e 106,65 mm, respectivamente.

Vale destacar que o número de episódios de irrigação dentro de cada nível de umidade do solo é diretamente proporcional ao conteúdo de água no solo. Ou seja, quanto maior o conteúdo de água no solo em base volumétrica, determinado pelo TDR, maior será o número de eventos de irrigação adotados ao longo da estação de crescimento da cultura do feijoeiro (Figura 6).

Stone e Moreira (2000) relataram que os componentes de rendimento do feijoeiro número de vagens por planta, número de grãos por vagem e massa de cem grãos apresentaram uma relação quadrática com a lâmina de água aplicada, sendo os valores máximos dos componentes aqueles obtidos com uma lâmina de água de, aproximadamente, 350 mm ao longo de todo o ciclo da cultura.

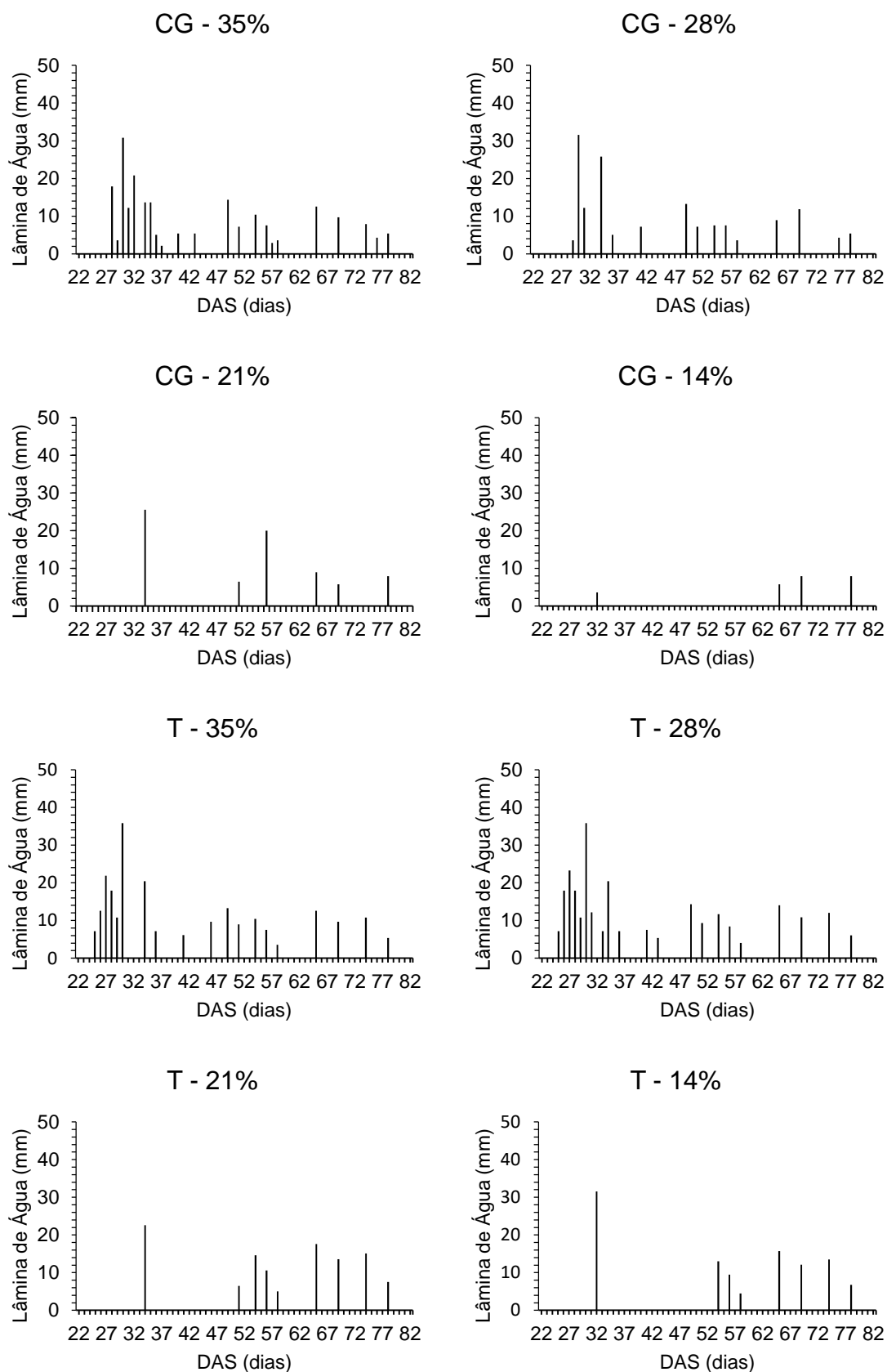


Figura 6 – Lâmina de irrigação aplicada ao longo da estação de crescimento de dois cultivares de feijoeiro e número de episódios de irrigação para cada tratamento de suprimento de água no solo em função de dias após a semeadura - DAS. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.

5.2 DESEMPENHO ECOFISIOLÓGICO

5.2.1 Fotossíntese Líquida (FL)

Na Tabela 5 são apresentados com os parâmetros ecofisiológicos determinados para a cultura do feijoeiro, cultivares Campos Gerais e Tuiuiú, sob condições de ambiente protegido. O cultivar Tuiuiú apresentou FL superior ao do cultivar Campos Gerais durante a avaliação realizada aos 30 dias após a emergência da cultura (DAE) (Figura 7). As plantas de feijoeiro descreveram um comportamento linear aos 23 DAE sendo que os valores de FL variaram de 16,2 a 20,3 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (valores não transformados) (Figura 8). Para as demais épocas os valores de FL não apresentaram diferenças significativas entre si e variaram de 16,5 a 19,5 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 30 DAE (valores não transformados), de 17,9 a 21,1 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 36 DAE e de 12,7 à 13,1 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aos 44 DAE. Os menores valores de FL aos 44 DAE podem estar associados à menor temperatura média registrada neste dia (21,4 °C).

As reações bioquímicas da fotossíntese são afetadas pela temperatura resultando em respostas complexas (TAIZ e ZEIGER, 2004), em que plantas C_3 atingem maiores valores de fotossíntese em temperaturas na faixa de 20-30°C, sendo maiores a 25°C (KERBAUY, 2004). Sob temperaturas baixas, a fotossíntese torna-se limitada devido à disponibilidade de fosfato na membrana do cloroplasto (TAIZ e ZEIGER, 2004) e decresce rapidamente se as temperaturas médias diárias excederem os limites térmicos fisiologicamente ideais (KERBAUY, 2004; TAIZ e ZEIGER, 2004). Chavarria et al. (2015), avaliando respostas fisiológicas em plantas de soja sob diferentes condições de suprimento de água no solo, obtiveram maiores taxas de FL sob os potenciais de água no solo de -40 e -60 cm de H_2O que resultaram em valores de FL de 19,30 e 18,39 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, corroborando com os resultados obtidos em nosso estudo. Sob potenciais mátricos de -260 cm de H_2O foi observada uma redução de 53,22% na FL, comparada ao nível de água no solo sob potenciais menos negativos. Sob potenciais matriciais de -420 e -1640 cm de H_2O as taxas de FL foram nulas. As plantas expostas a altos níveis de demanda evaporativa da atmosfera em associação às condições hídricas do solo incipiente tendem a diminuir a condutância dos estômatos de modo a reduzir a perda de água e manter o seu equilíbrio hídrico. Assim, quanto maior for a

deficiência hídrica, menor será a condutância estomática e, conseqüentemente, menor será a taxa de assimilação de CO₂ atmosférico (KERBAUY, 2004). Dessa forma, a disponibilidade de fotossintatos sob restrição hídrica torna-se menor para o enchimento das vagens do feijoeiro (OLIVEIRA et al., 2005).

Tabela 5 – Resumo da análise de variância para os parâmetros ecofisiológicos determinados através do IRGA: fotossíntese líquida (FL), condutância estomática (CE), concentração de carbono intercelular (Ci), Transpiração (Tr), eficiência fotossintética de uso de água (EUA), eficiência de carboxilação (ECi).

Fonte de variação	G. L.	Quadrados Médios					
		23 DAE					
		FL ^T	CE	Ci ^T	Tr	EUA	ECi ^T
Cultivar (C)	1	589,15 ^{ns}	0,0255 ^{ns}	111312152 ^{ns}	0,2888 ^{ns}	0,4924 ^{ns}	0,00021 ^{ns}
Água (A)	3	7977,54 ^{**}	0,0035 ^{ns}	205175694 [*]	1,8575 ^{ns}	0,3679 [*]	0,00278 ^{**}
C x A	3	3053,57 ^{ns}	0,0090 ^{ns}	167564788 ^{**}	0,4305 ^{ns}	0,2347 ^{ns}	0,00124 [*]
C.V. (%)		19,66	24,42	18,08	6,78	12,13	0,54
Fonte de variação	G. L.	Quadrados Médios					
		30 DAE					
		FL ^T	CE ^T	Ci ^T	Tr ^T	EUA	ECi ^T
Cultivar (C)	1	16531,28 [*]	0,3845 ^{ns}	16002559 ^{ns}	45,2459 [*]	0,2623 ^{ns}	0,0356 ^{ns}
Água (A)	3	3562,77 ^{ns}	0,2373 ^{ns}	375993463 ^{**}	91,7898 ^{**}	0,5803 ^{ns}	0,0694 ^{**}
C x A	3	134,53 ^{ns}	0,0563 ^{ns}	141428827 ^{ns}	24,3355 ^{ns}	0,2796 ^{ns}	0,0174 ^{ns}
C.V. (%)		31,13	37,80	27,13	20,60	14,93	6,62
Fonte de variação	G. L.	Quadrados Médios					
		36 DAE					
		FL	CE	Ci ^T	Tr	EUA	ECi ^T
Cultivar (C)	1	10,1106 ^{ns}	0,00002 ^{ns}	32 ^{**}	2,7596 ^{ns}	0,4770 ^{ns}	0,0231 ^{ns}
Água (A)	3	15,2661 ^{ns}	0,01540 ^{**}	128885265 [*]	17,3384 ^{**}	1,2168 ^{**}	0,2467 ^{ns}
C x A	3	3,9073 ^{ns}	0,00247 ^{ns}	54536884 ^{ns}	2,2026 ^{ns}	0,4576 ^{ns}	0,1101 ^{ns}
C.V. (%)		13,51	22,24	18,30	18,17	16,19	18,57
Fonte de variação	G. L.	Quadrados Médios					
		44 DAE					
		FL	CE ^T	Ci	Tr	EUA ^T	ECi ^T
Cultivar (C)	1	17,0784 ^{ns}	0,0238 ^{ns}	442,64 ^{ns}	1,0041 ^{ns}	0,00003 ^{ns}	0,0039 ^{ns}
Água (A)	3	0,2540 ^{ns}	0,0184 ^{ns}	1976,57 ^{ns}	0,4325 ^{ns}	0,00006 ^{ns}	0,0043 ^{ns}
C x A	3	29,3322 ^{ns}	0,1201 [*]	2985,65 ^{ns}	1,5682 [*]	0,00005 ^{ns}	0,0071 ^{ns}
C.V. (%)		24,36	27,99	18,62	31,81	1,06	4,97

ns - não significativo a 5% e 1% de probabilidade.

T – Valores submetidos à transformação de Box-Cox

** - significativo a 5% e 1%, respectivamente.

C.V. – coeficiente de variação.

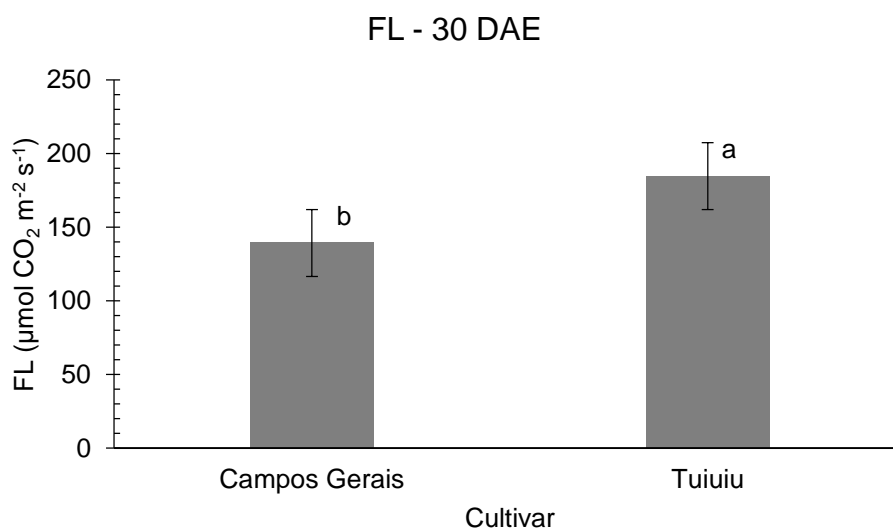


Figura 7 – Fotossíntese líquida dos cultivares de feijoeiro cultivados sob condições de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Letras diferentes para cultivar, diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).

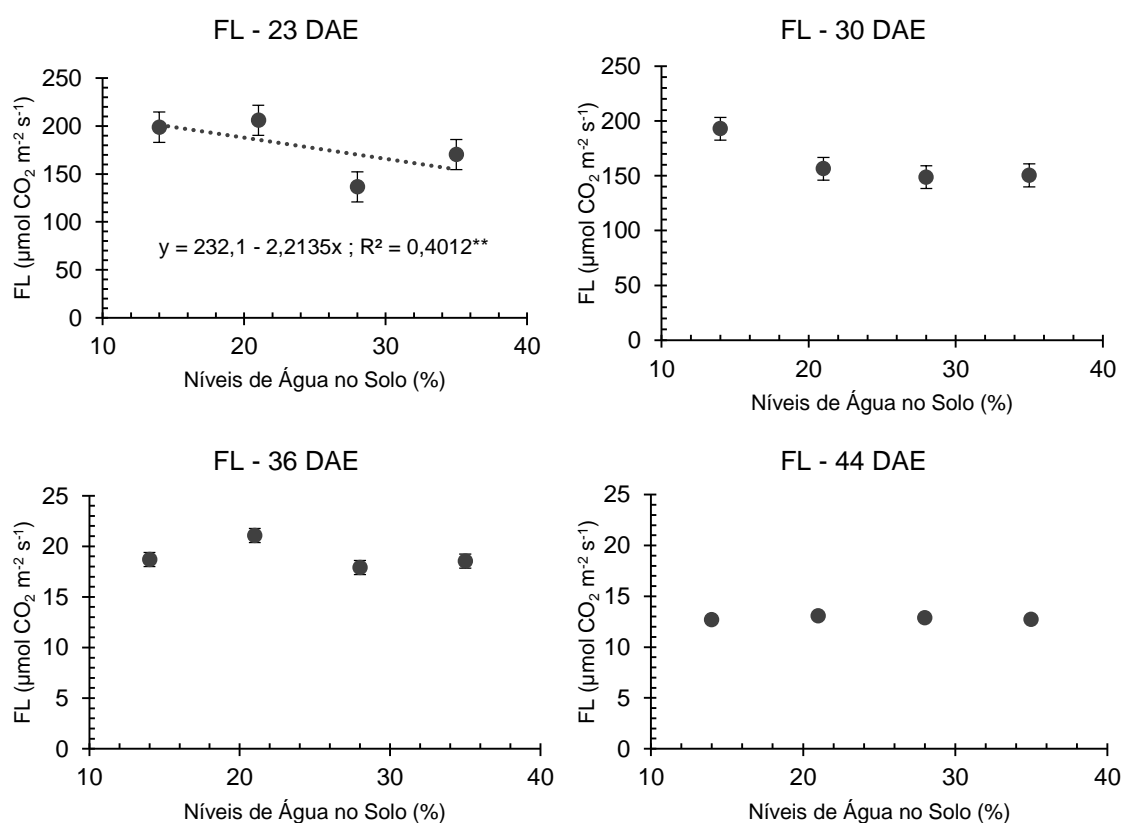


Figura 8 – Fotossíntese líquida em função de níveis de água no solo para cada época de avaliação sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Os dados de 23 e 30 DAE foram transformados por Box-Cox.

5.2.2 Condutância Estomática (CE)

A CE não diferiu ao nível de 95% de confiabilidade para todas as época de avaliação em ambos os cultivares. A resposta fisiológica das plantas sob os níveis de água estudados foi descrita por um modelo linear aos 36 e 44 DAE (Figura 9). Nas demais épocas os valores de CE não diferiram entre si. As plantas de feijoeiro apresentaram CE variando de 0,32 a 0,36 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ aos 23 DAE, de 0,38 a 0,63 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ aos 30 DAE, de 0,25 a 0,34 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ (valores não transformados) aos 36 DAE e de 0,13 a 0,16 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ aos 44 DAE (valores não transformados). A CE sofreu efeito significativo para a interação cultivar e níveis de água aos 44 DAE, sendo que o cultivar Tuiuiú apresentou desempenho superior em relação a Campos Gerais com 35% de umidade em base volumétrica. (Tabela 5).

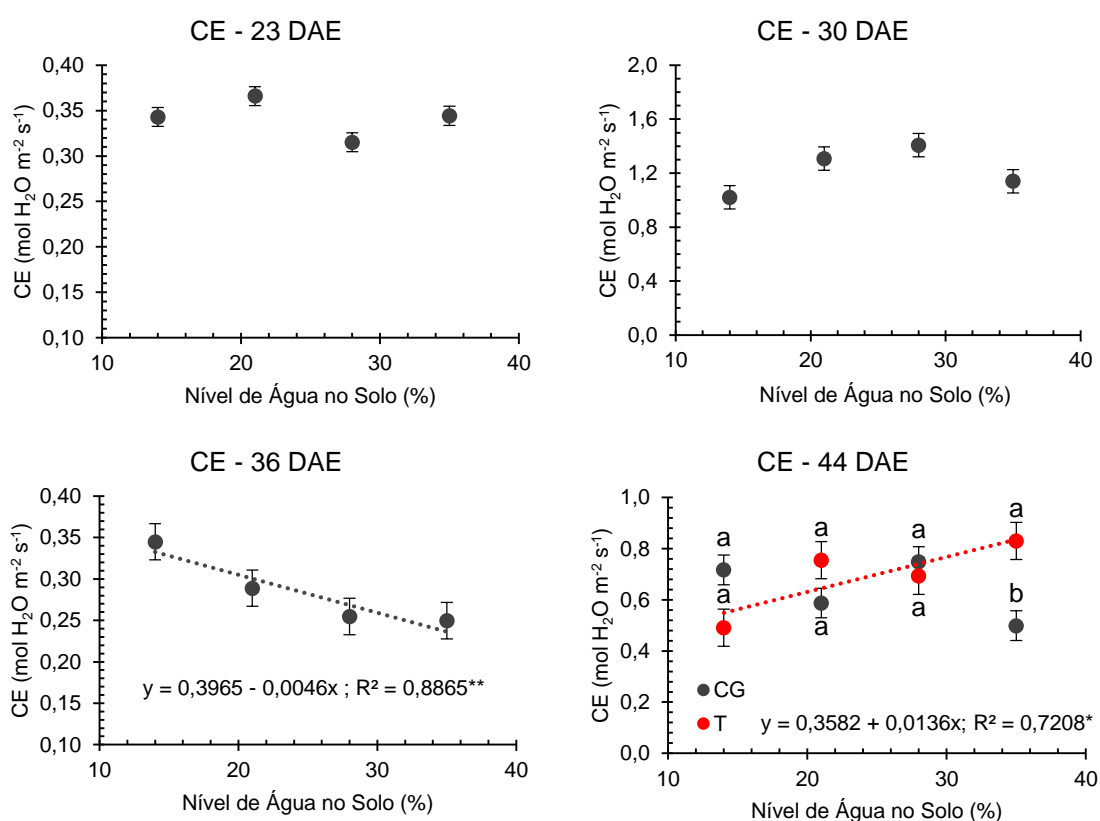


Figura 9 – Condutância estomática em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas realizadas aos 30 e 44 DAE foram transformados por Box-Cox e somados ao fator 2. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).

Oliveira et al. (2005) obtiveram valores de CE variando de 0,1216 a 0,1470 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ para crescimento vegetativo e de 0,0698 a 0,1220 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ na etapa de florescimento da cultura, tendo sido inferiores aos valores encontrados no presente estudo. Os tratamentos de umidade do solo foram definidos pelos referidos autores em função do nível de déficit hídrico por ocasião das irrigações. Assim, a irrigação foi efetuada quando a ET_c acumulada foi de 22 (T1), 33 (T2) e 44 (T3) mm e por fim um tratamento de água apenas para estabelecimento da cultura (T4). Os valores de CE reportados por esses autores foram mais elevados sob tratamentos de maior suprimento de água no solo. Os tratamentos com T2, T3, T4 apresentaram uma redução na CE durante a fase de floração. Paiva et al. (2005) avaliaram a CE em feijoeiro irrigado em função da fração de esgotamento da capacidade de água no solo (CAD): T1 - irrigado quando se esgotou 40% da capacidade de água disponível; T2 - quando se esgotou 60% da CAD; T3 - quando houve redução de 80% da CAD, e T4 –tratamento não irrigado. Esses autores obtiveram grande diferença entre os tratamentos T1 e T4 durante o ciclo da cultura. Os valores de CE foram de 0,4560 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ no estágio fenológico V4 e 0,7266 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ no estágio fenológico R6 para T1, bem como de 0,3220 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ no estágio fenológico V4 e 0,4408 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ no estágio fenológico R6 para T4.

De acordo com Silva et al. (1998), sob condições de baixa umidade do solo os estômatos fecham-se antecipadamente pela manhã, sendo que, nessa condição, a resposta fisiológica de plantas é muito mais significativamente afetada pelo “status” de água na planta do que pela disponibilidade de energia radiante para a fotossíntese. A redução obtida na CE decorrente da menor disponibilidade de água no solo ocasiona queda no potencial de água nas folhas, resultando no fechamento estomático e na perda de turgescência das células (NASCIMENTO, et al., 2011).

5.2.3 Concentração de Carbono Intercelular (Ci)

A Figura 11 apresenta o comportamento da Ci sob os níveis de água no solo para as quatro épocas de avaliação. O cultivar Campos Gerais apresentou Ci superior a do cultivar Tuiuiú durante a avaliação realizada aos 36 dias DAE (Figura 10). Os valores de Ci variaram de 228,81 a 275,72 μmol de CO₂ mol⁻¹ aos 23 DAE, 221,10 a 286,12 μmol de CO₂ mol⁻¹ aos 30 DAE (valores não transformados para

ambas épocas), apresentando comportamento linear crescente. Aos 36 DAE os valores variaram de 209,88 a 251,66 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ (valores não transformados) apresentando um comportamento quadrático decrescente e aos 44 DAE valores variando de 191,08 a 226,91 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, sendo que nessa época os valores não diferiram entre si. A C_i sofreu efeito significativo para a interação cultivar e níveis de água aos 23 DAE, sendo que o cultivar Tuiuiu apresentou desempenho superior ao do Campos Gerais com 14% de umidade em base volumétrica.

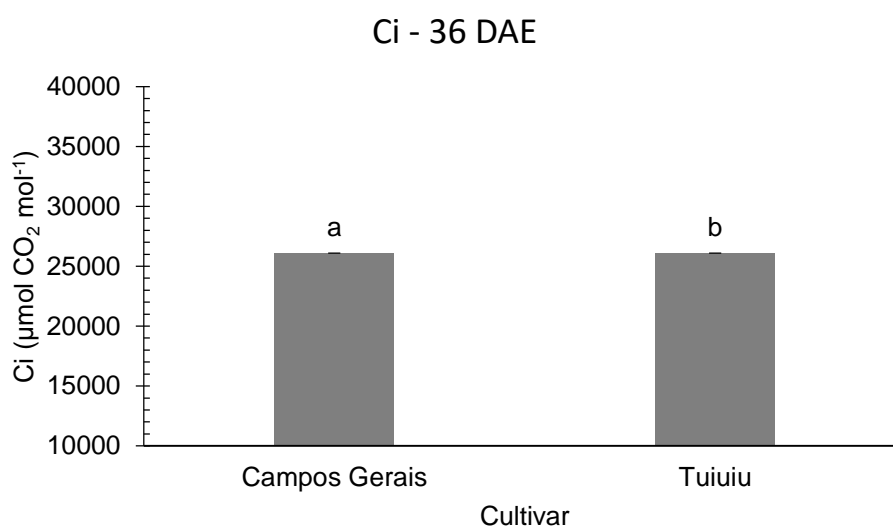


Figura 10 – Concentração de carbono intercelular dos cultivares de feijoeiro cultivados sob condições de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Letras diferentes para cultivar, diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).

Ferraz et al. (2012), examinando o efeito de três ecótipos diferentes de feijoeiro e dois momentos de avaliação no estado de Goiás sobre o comportamento fisiológico da cultura, obtiveram valores de C_i que variaram de 222 a 245,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ entre 9 e 10h da manhã e valores de 277 a 289,6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ obtidos entre 10 e 11h, os quais se aproximaram daqueles encontrados no presente estudo. Dentre os períodos de avaliação do referido parâmetro ecofisiológico sob todas as condições impostas no experimento o correspondente a 30 DAE foi aquele que proporcionou os maiores valores de C_i . Isso pode ser explicado pela maior temperatura medida no ambiente experimental no transcorrer desse período de desenvolvimento da cultura, induzindo maior taxa de absorção de CO_2 atmosférico. Em geral, os maiores níveis de umidade no solo estão associados a maiores valores de C_i . Entretanto, sob situação de déficit hídrico há uma redução na condutância estomática resultando em

menor taxa de fixação de CO₂ e, por conseguinte, em diminuição na concentração desse gás nos espaços intercelulares do tecido vegetal (menores valores de Ci) (KERBAUY, 2004; PIMENTEL, 1998).

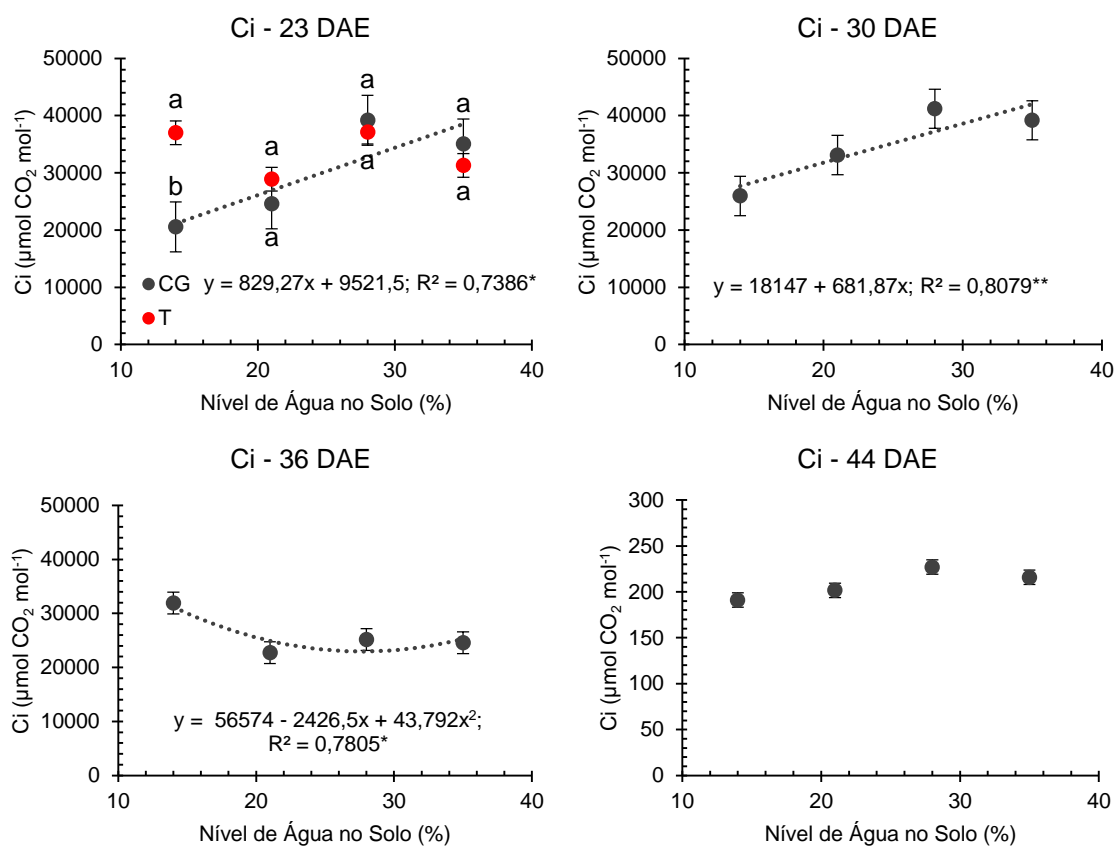


Figura 11 – Concentração de carbono intracelular em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas realizadas aos 23, 30 e 36 DAE foram transformados por Box-Cox. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).

A Ci no mesófilo foliar é reduzida pelo fechamento estomático, com consequente diminuição na taxa de assimilação de CO₂ (JADOSKI, et al., 2005). Assim, a maior taxa de crescimento das plantas está associada à maior concentração de CO₂ atmosférico, sendo que o CO₂ é o substrato para a fotossíntese (GABRIEL, et al., 2013). A maior concentração de CO₂ proporciona maior taxa de assimilação de CO₂, mesmo com a redução da transpiração e condutância estomática, sendo que o fechamento parcial dos estômatos observado não anulou o gradiente de concentração de CO₂ entre a atmosfera e câmara subestomática (IMAI, et al., 1984; GABRIEL, et al., 2013). Fernández et al. (2002) avaliaram durante oito meses a campo em câmaras de topo aberto, o efeito de

diferentes quantidades de CO₂ em plantas de mandioca nos níveis de 480 ppm e 680 ppm sobre a fotossíntese líquida (FL). A FL foi superior nas folhas submetidas à maior concentração de CO₂ (680 ppm) do que naquelas submetidas a 480 ppm em dois ambientes de cultivo. Da mesma forma, sob as condições ambientais de nosso estudo a Ci apresentou uma relação direta com a FL.

5.2.4 Transpiração (Tr)

Para a Tr ocorreu efeito significativo do fator cultivar aos 30 DAE e da interação cultivar e nível de água no solo aos 44 DAE (Tabela 5). O cultivar Tuiuiú apresentou maior Tr em relação a Campos Gerais (Figura 12). Na Figura 13 os valores médios das taxas de transpiração sob os quatro níveis de água no solo não diferiram significativamente entre si aos 23 DAE e apresentaram tendência explicada por modelo linear crescente nas demais épocas de avaliação. No geral, não foi observado efeito esperado dos níveis de umidade do solo sobre Tr sob as condições de ambiente protegido. Isto porque provavelmente a disponibilidade energética sobre as plantas que receberam menor lâmina de irrigação mascarou a resposta das plantas de feijoeiro aos níveis de suprimento de água considerados no presente estudo.

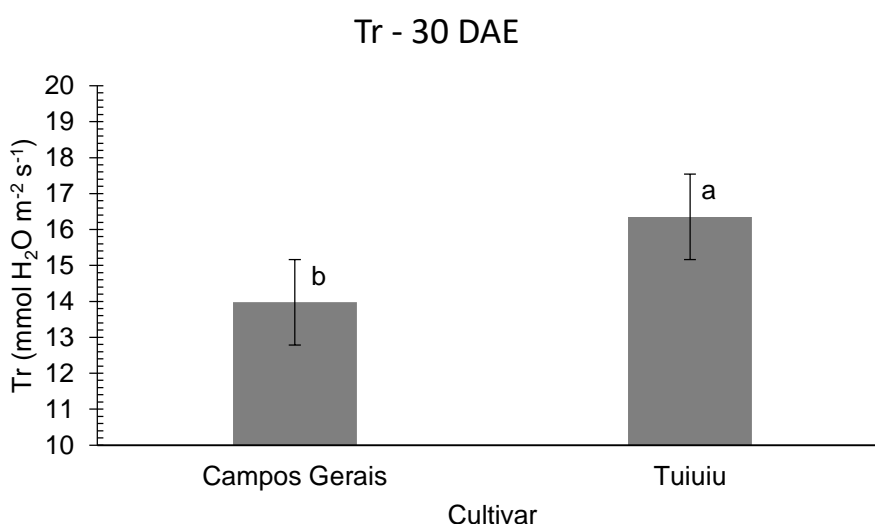


Figura 12 – Transpiração dos cultivares de feijoeiro cultivados sob condições de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Letras diferentes para cultivar, diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).

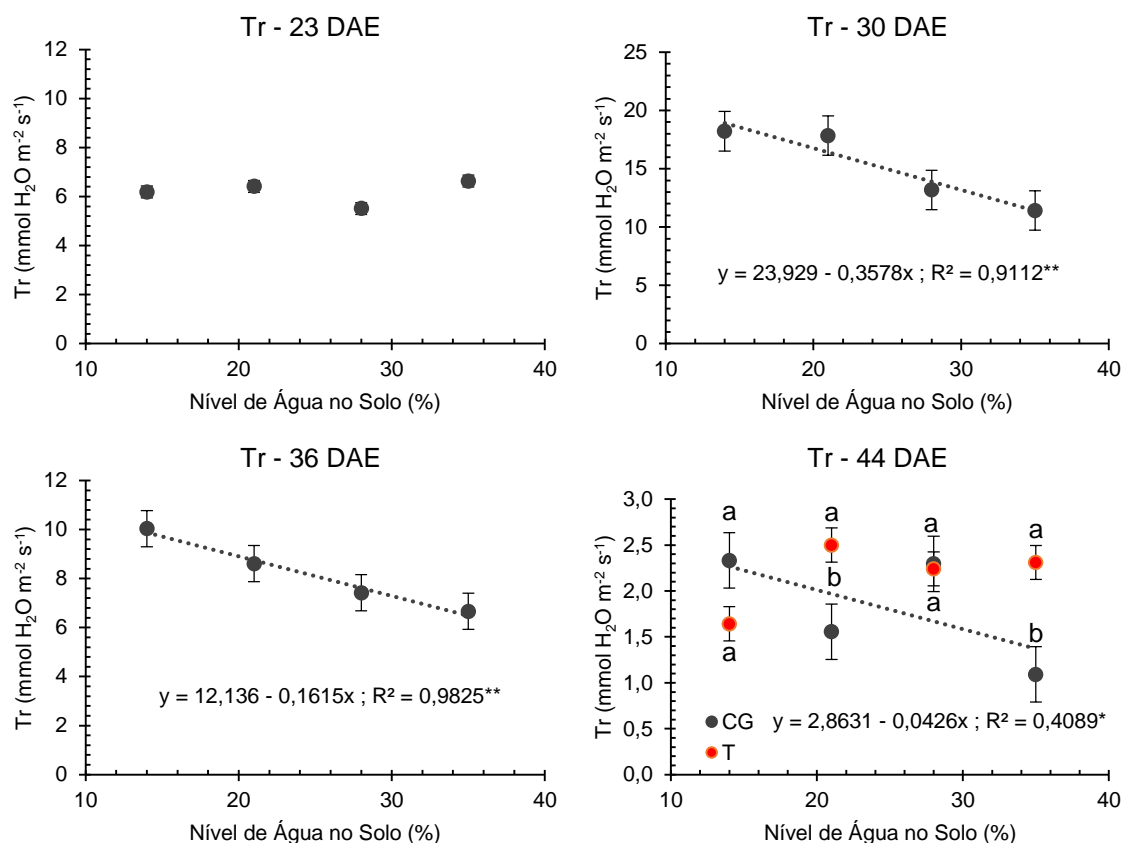


Figura 13 – Transpiração em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas efetuadas aos 30 DAE foram transformados por Box-Cox. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).

5.2.5 Eficiência Fotossintética do Uso da Água (EUA)

No que tange a EUA não houve efeito de cultivares em decorrência dos diferentes níveis de umidade do solo (Figura 14). A tendência de EUA pode ser descrita por modelo linear variando de 2,775 a 3,234 aos 23 DAE [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$] e de 1,888 a 2,806 aos 36 DAE [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$]. Nas demais épocas os valores de EUA não diferiram significativamente entre si.

Da mesma forma que neste estudo, Guoju et al. (2016) obtiveram aumento na EUA durante a fase de florescimento em feijoeiro cultivado em regiões áridas da China. Os valores de EUA que foram de 3 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$] no desenvolvimento vegetativo, aumentaram para valores pouco acima de 6 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$] no florescimento. Fernández et al. (2002), analisando a resposta fisiológica de plantas de mandioca submetidas a duas

concentrações de CO₂ atmosférico, observaram menor CE em plantas expostas a maior concentração de CO₂. Assim, o fechamento parcial dos estômatos provoca aumento da EUA pela alta taxa fotossintética, resultando em maior acúmulo de fitomassa por unidade de água transpirada (GABRIEL, et al., 2013). Da mesma forma, no presente estudo por ocasião da época de maior EUA CE foi menor. Tenhunen et al. (2002) verificaram que o aquecimento global acelerou a transpiração das culturas e a evaporação do solo, e influenciou a EUA em regiões áridas e semi-áridas. A EUA nas culturas para esses sistemas ecológicos diminuiu com a redução da umidade do solo e isso demonstra que a fotossíntese é influenciada por alguns outros fatores, além do fator estomático. Zhao et al. (2007) descobriram que a FL e a CE em trigo durante o estágio de enchimento de grão leitoso em regiões semi-áridas diminuíram e a Tr aumentou com a elevação da temperatura do ar; assim a fotossíntese e a acumulação de substâncias secas foram inibidas e como resultado a EUA foi reduzida.

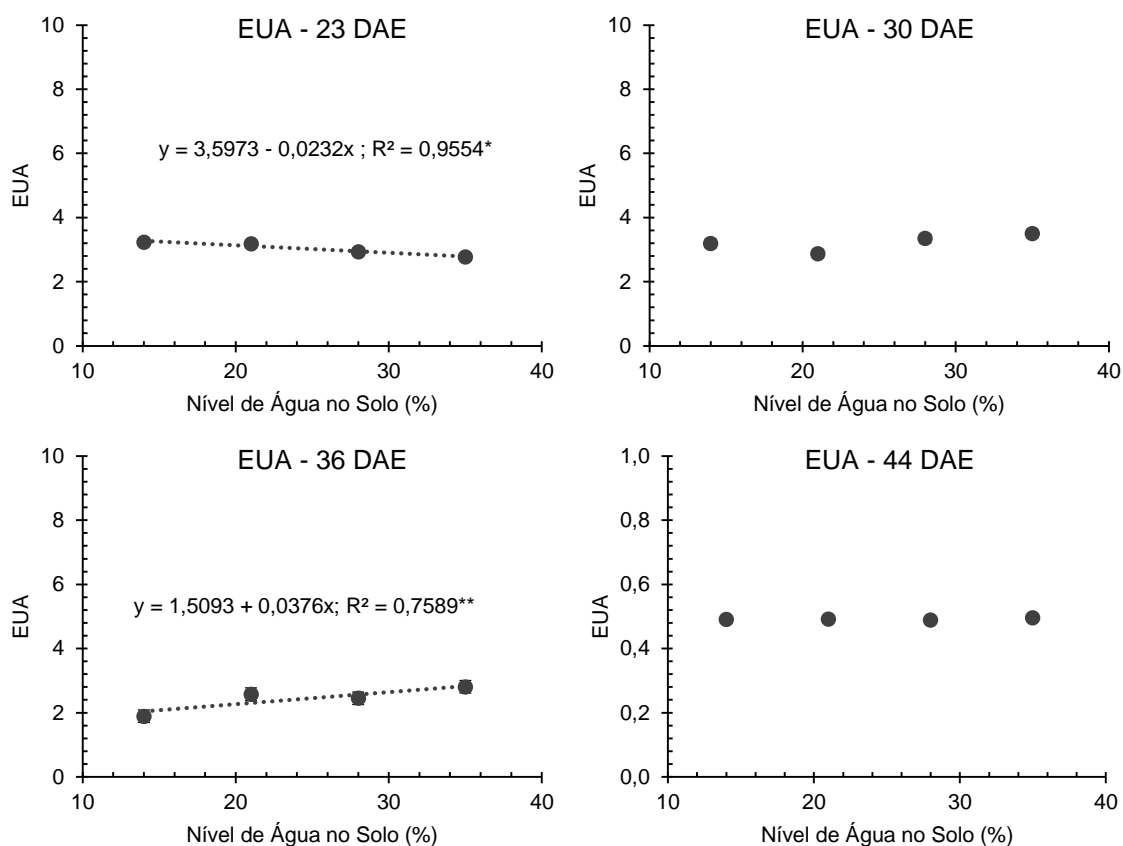


Figura 14 – Eficiência fotossintética de uso de água em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas feitas aos 44 DAE foram transformados por Box-Cox.

5.2.6 Eficiência de Carboxilação (ECi)

A ECi apresentou efeito significativo de interação cultivar por nível de água aos 23 DAE. A resposta de ECi sob diferentes níveis de água no solo a 23 e 30 DAE foi descrita por um modelo linear e a 36 e 44 DAE os valores não se diferiram entre si (Figura 15). Os valores de ECi variaram de 0,059 a 0,091 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}$] aos 23 DAE, de 0,060 a 0,096 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}$] aos 30 DAE, de 0,076 a 0,104 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}$] aos 36 DAE e de 0,057 a 0,072 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}$] aos 44 DAE (valores não transformados para todas as épocas). A Ci sofreu efeito significativo para a interação cultivar e níveis de água aos 23 DAE, sendo que o cultivar Campos Gerais apresentou desempenho superior ao do Tuiuiú com 14% de umidade em base volumétrica.

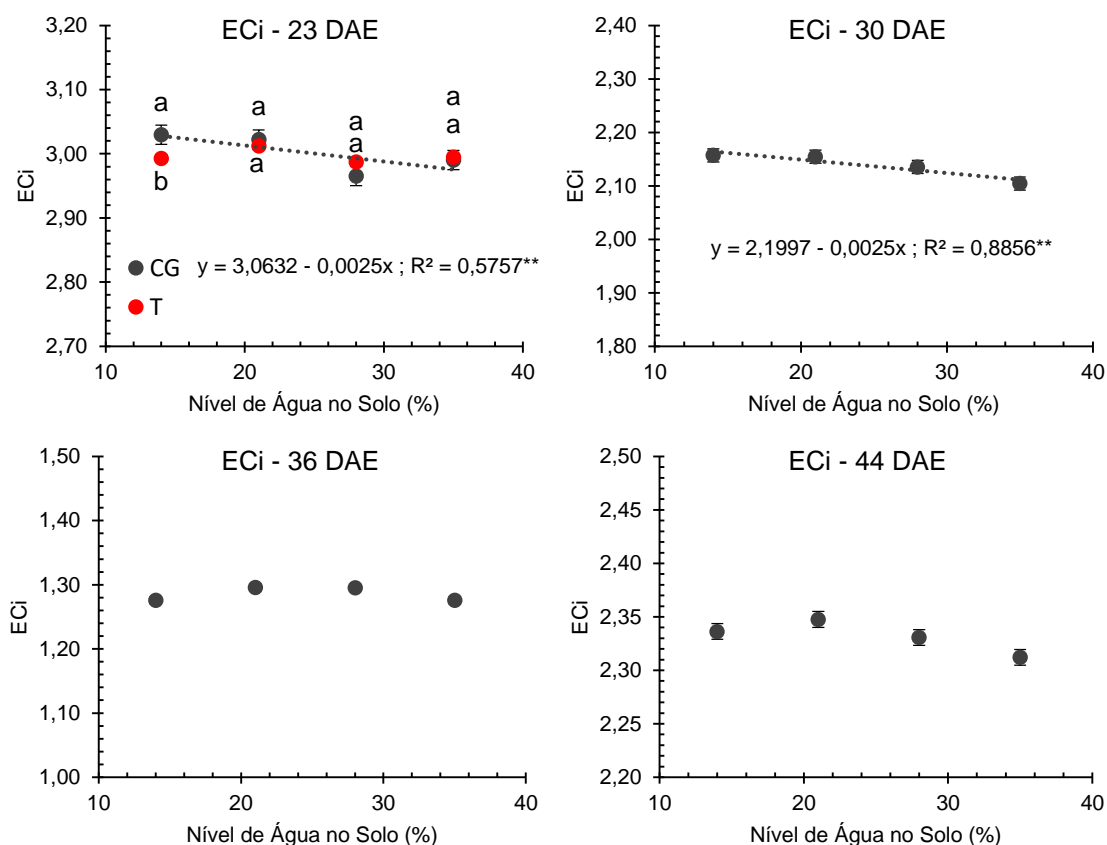


Figura 15 – Eficiência de carboxilação em função de níveis de água no solo, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. As medidas feitas aos 23, 30, 36 e 44 DAE foram transformados por Box-Cox e somados ao fator 4. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).

Ferraz et al. (2012), estudando a influência de três ecótipos de feijoeiro e momento de avaliação sobre o comportamento fisiológico da cultura, encontraram valores de EC_i variando de 0,068 a 0,079 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}$] entre 10 e 11h da manhã, bem como valores de EC_i entre 0,029 e 0,041 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1})^{-1}$] das 9 às 10h da manhã. Para Machado et al. (2005), a EC_i possui estreita relação com a C_i e com a taxa de assimilação de CO_2 .

Em geral, o feijoeiro apresenta dois mecanismos de adaptação ao déficit hídrico: controle estomático (LAFFRAY e LOUGHT, 1990; PIMENTEL et al., 1999) e desenvolvimento radicular (KURUVADI e AGUILERA, 1990). Santos et al. (2014) avaliaram o desempenho ecofisiológico de milho, sorgo e braquiária, plantas C_4 , em ambiente protegido com e sem restrição hídrica iniciada após 69 dias da emergência num período de 21 dias. Com esse trabalho obtiveram redução da CE e da fotossíntese para as três culturas em estudo. A Tr reduziu para milho e braquiária e a EUA aumentou para o milho e não alterou para as demais culturas. A FL foi de 14, 21 e 23 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o tratamento controle e de 4, 16 e 8 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o de restrição hídrica em milho, sorgo e braquiária, respectivamente. A CE foi de 0,055; 0,09 e 0,11 $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o tratamento controle e de 0,005; 0,06 e 0,02 $\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o de restrição hídrica em milho, sorgo e braquiária. A Tr foi de 1,8; 3,8 e 4,7 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o tratamento controle e 0,3; 2,6 e 1,4 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o de restrição hídrica em milho, sorgo e braquiária, respectivamente. A EUA foi de 8, 5 e 8 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$] para o tratamento controle e 20, 6 e 10 [$(\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$] para o de restrição hídrica em milho, sorgo e braquiária, respectivamente. Nessas culturas de metabolismo C_4 foram obtidos menores valores de CE e Tr , valendo mencionar que plantas C_3 exigem uma maior CE para manter taxas fotossintéticas positivas, sendo que a perda de água em plantas C_3 por transpiração é bem maior do que em plantas C_4 . Isto se comprova pelo fato de plantas C_3 apresentarem uma EUA mais elevada do que as plantas de metabolismo C_4 .

5.3 NÚMERO DE VAGENS POR PLANTA (NVP), NÚMERO DE GRÃOS POR VAGEM (NGV), MASSA DE GRÃOS POR PLANTA (MGP) E MASSA DE CEM GRÃOS (MCG)

O NVP não foi afetado significativamente pelo fator cultivar (Tabela 6). Para o fator nível de água no solo o feijoeiro cultivado em ambiente protegido apresentou

tendência linear como demonstrado na Figura 16, ou seja, a medida que o suprimento hídrico do solo aumenta observa-se um incremento linear na variável resposta em estudo. O maior NVP foi de 10,25 e o menor foi de 7,08 sob os níveis de água no solo de 35% e 14%, respectivamente. Tatagiba et al. (2013) avaliaram o rendimento de feijoeiro em ambiente protegido, com plantas submetidas a níveis de umidade do solo de 100 e 50% da capacidade de campo. As plantas sob níveis de água no solo de 100% da capacidade de campo apresentaram valores médios de NVP superior em relação a plantas submetidas a 50% da capacidade de campo sob as condições climáticas de Viçosa, MG.

Os valores de NVP obtidos neste estudo foram superiores aos encontrados por Tatagiba et al. (2013). Avaliando grupo de genótipos de feijoeiro com e sem restrição hídrica, Aguiar et al. (2008) obtiveram redução de NVP, variando de 50,4% a 69,1% para o grupo preto e de 11,1% a 58,5% para o grupo carioca. Essa restrição hídrica foi imposta durante o período de vinte dias a partir do início do florescimento. Não se constatou efeito de interação entre os fatores nível de água e cultivar.

Tabela 6 – Resumo da análise de variância para número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP) e massa de cem grãos (MCG) em população de plantas de feijoeiro cultivadas sob condição de ambiente protegido.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios			
		NVP	NGV	MGP	MCG
Cultivar (C)	1	2,5208 ^{ns}	0,2552 ^{ns}	4,6563 ^{ns}	62,9979 ^{**}
Nível de água (A)	3	27,5764 ^{**}	0,3835 ^{ns}	17,8835 ^{**}	12,2238 ^{ns}
C x A	3	2,0208 ^{ns}	3,5806 ^{**}	3,3572 ^{ns}	10,2040 ^{ns}
C.V. (%)		18,94	12,22	25,57	12,47

ns - não significativo.

*, ** - significativo a 5% e 1% de confiabilidade, respectivamente.

C.V. – coeficiente de variação.

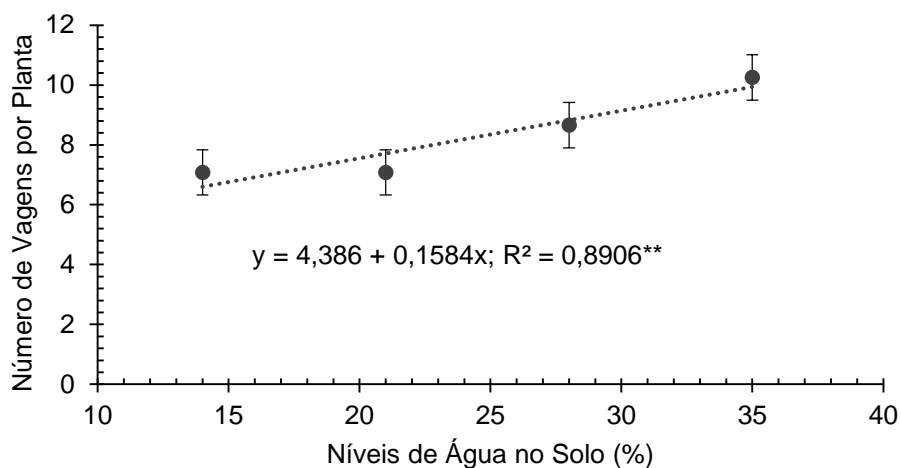


Figura 16 – Número de vagens por planta da cultura do feijoeiro em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.

O NGV não foi condicionado pelo cultivar e nem tampouco pelas condições hídricas do solo. Porém, efeito de interação entre cultivar e suprimento de água no solo foi observado (Tabela 6). Para o cultivar Campos Gerais o nível de água no solo de 14% proporcionou maior NGV em plantas de feijoeiro do que os níveis de água de 35% e 28% com 95% de confiabilidade. Já o cultivar Tuiuiú sob nível de água no solo de 28% apresentou NGV superior em relação aos demais tratamentos de água. O cultivar Campos Gerais apresentou NGV superior ao Tuiuiú sob o nível de água de 14%. Sob o nível de água de 28% o cultivar Tuiuiú foi superior em relação a Campos Gerais. Sob os níveis de água 35% e 21%, não se constatou diferenças significativas de NGV entre os cultivares utilizados (Figura 17).

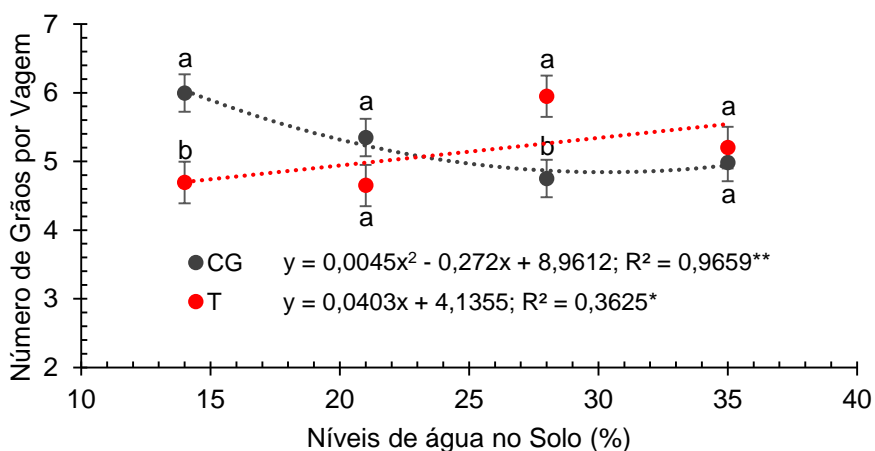


Figura 17 – Número de grãos por vagem em função de níveis de água no solo para os cultivares de feijoeiro Campos Gerais e Tuiuiú, sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú. Letras diferentes dentro do mesmo nível de água no solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).

Avaliando grupos de genótipos de feijoeiro preto e carioca, Aguiar et al. (2008) verificaram comportamentos distintos para essa característica em ambos os grupos, tanto o preto como o carioca, submetidos ou não a restrição hídrica durante 20 dias a partir do início do florescimento.

Da mesma forma que o NVP, a MGP não apresentou efeito do fator cultivar (Tabela 6) e apresentou correlação positiva linear para o fator disponibilidade de água no solo (Figura 18). O valor máximo de MGP foi de 9,84 g e o mínimo de 7,07 g sob os níveis de água de 35% e 21%, respectivamente. Aguiar et al. (2008) obtiveram redução significativa de MGP variando de 52,5% a 69,1% para genótipos de feijoeiro preto e de 36,8% a 62,8% para aqueles do grupo carioca, ambos submetidos à restrição hídrica imposta durante 20 dias após o início do florescimento.

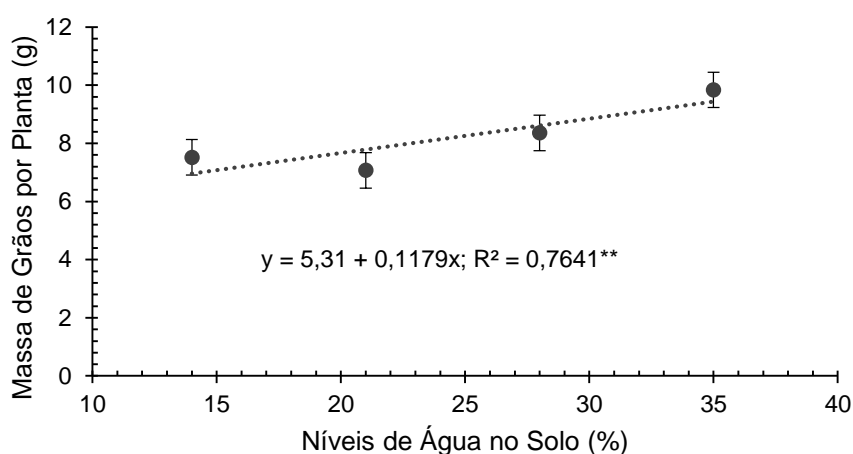


Figura 18 – Massa de grãos por planta da cultura do feijoeiro em função dos níveis de água no solo sob condição de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. 2016.

A MCG apresentou diferenças significativas para o fator cultivar (Tabela 6). No que tange a este componente de rendimento o cultivar Tuiuiú apresentou desempenho superior ao do cultivar Campos Gerais (Figura 19). Esta diferença pode ser explicada pelas características genéticas dos materiais estudados.

Avaliando grupos de genótipos de feijoeiro preto e carioca, Aguiar et al. (2008) obtiveram respostas distintas entre os grupos de feijoeiro estudados para este componente de rendimento da cultura, submetidos ou não a restrição hídrica durante 20 dias a partir do início do florescimento. Não foram observados efeito isolado de níveis de umidade no solo, bem como efeito de interação entre os fatores cultivar e umidade do solo sobre a MCG do feijoeiro.

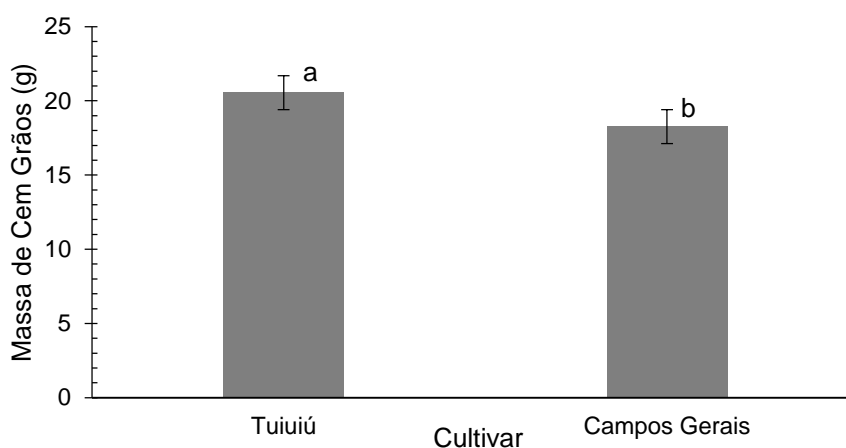


Figura 19 – Massa de cem grãos da cultura do feijoeiro em função dos cultivares sob condição de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR. Letras diferentes para cultivar diferem estatisticamente pelo teste S-N-K ($p < 0,05$).

A deficiência hídrica na fase de floração provoca a abscisão de flores, com a consequente redução do número de vagens. Durante o enchimento de grãos o déficit hídrico acarretará redução do número de grãos e peso das vagens (OLIVEIRA et al., 2005).

Na Tabela 7 são apresentadas as correlações lineares simples entre os componentes de rendimento do feijoeiro obtidos após o seu cultivo em ambiente protegido. As correlações entre os componentes de rendimento foram significativas apenas para NVP x MGP ($r = 0,7715^*$). As outras correlações foram mais fracas e não significativas. O NVP x MCG apresentou correlação média e negativa ($r = -0,5629$), demonstrando um certo grau de associação entre as duas variáveis. As correlações restantes apresentaram fraco grau de associação.

Montanari et al. (2013) obtiveram correlação significativa entre NVP x MGP, porém o grau de associação entre ambos foi mais fraco ($r = 0,271^{**}$) comparado ao encontrado no presente estudo. Entretanto, os referidos autores constataram correlação mais forte e positiva para NVP x NGV ($r = 0,741^{**}$), contrapondo-se com os resultados obtidos em nosso estudo, onde o grau de associação desses componentes de rendimento foi muito baixo e negativo. As demais correlações obtidas por Montanari et al. (2013) foram muito fracas e não significativas: NGV x MGP ($0,111^{ns}$), MCG x MGP ($-0,017^{ns}$), MCG x NVP ($-0,057^{ns}$) e MCG x NGV ($-0,057^{ns}$).

Tabela 7 – Coeficientes de correlação para o confronto entre os componentes de rendimento número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), massa de grãos por planta (MGP) e massa de cem grãos (MCG).

	NGV	MGP	MCG
NVP	-0,1584 ^{ns}	0,7715*	-0,5629 ^{ns}
NGV		0,3709 ^{ns}	-0,0527 ^{ns}
MGP			-0,1968 ^{ns}

ns: não significativo; * e **: significativo a 5% e 1% pela correlação de Pearson.

5.4 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

5.4.1 Densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA), microporosidade (MI) e condutividade hidráulica (K_0)

A DS foi afetada significativamente pelo fator cultivar (Tabela 8), tendo sido o cultivar Campos Gerais superior ao Tuiuiú com relação a este atributo físico do solo (Figura 20). Os níveis de água no solo correlacionaram-se positiva e linearmente com DS (Figura 21), em que o maior valor de DS foi de $0,88 \text{ g cm}^{-3}$ e o menor de $0,82 \text{ g cm}^{-3}$ para 35% e 14% de umidade do solo em base de volume, respectivamente. Para os diferentes níveis de umidade o solo foi submetido a diferentes ciclos de umedecimento e secamento. Previamente a aplicação dos tratamentos, o solo em todos os canteiros foi submetido a oito ciclos de umedecimento e secamento. Posteriormente, com aplicação dos diferentes níveis de água, o solo dos canteiros foi submetido a distintos ciclos de umedecimento e secamento, como descrito na Tabela 9.

Tabela 8 – Resumo da análise de variância para densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (MA), microporosidade (MI) e condutividade hidráulica (K_0) (dados transformados) sob influência dos fatores estudados em plantas de feijoeiro sob condições de ambiente protegido.

Fonte de Variação	G.L.	Quadrados Médios				
		DS	PT	MA	MI	K_0^T
Cultivar	1	0,00305*	0,00055*	0,00253*	0,00072 ^{ns}	0,00737 ^{ns}
Água	3	0,00833**	0,00149**	0,01040**	0,00404**	0,40831*
C x A	3	0,00142 ^{ns}	0,00026 ^{ns}	0,00086 ^{ns}	0,00018 ^{ns}	0,05464 ^{ns}
C.V. (%)		3,11	1,73	7,97	3,86	25,48

ns - não significativo.

T – Valores submetidos à transformação de Box-Cox

*, ** - significativo a 5% e 1% de confiabilidade, respectivamente.

C.V. – coeficiente de variação.

Tabela 9 – Números de irrigações aplicadas sobre o solo para os diferentes níveis de umidade.

Cultivar	Níveis de Água no Solo (%)			
	35	28	21	14
Campos Gerais	22	15	7	4
Tuiuiú	19	21	10	10

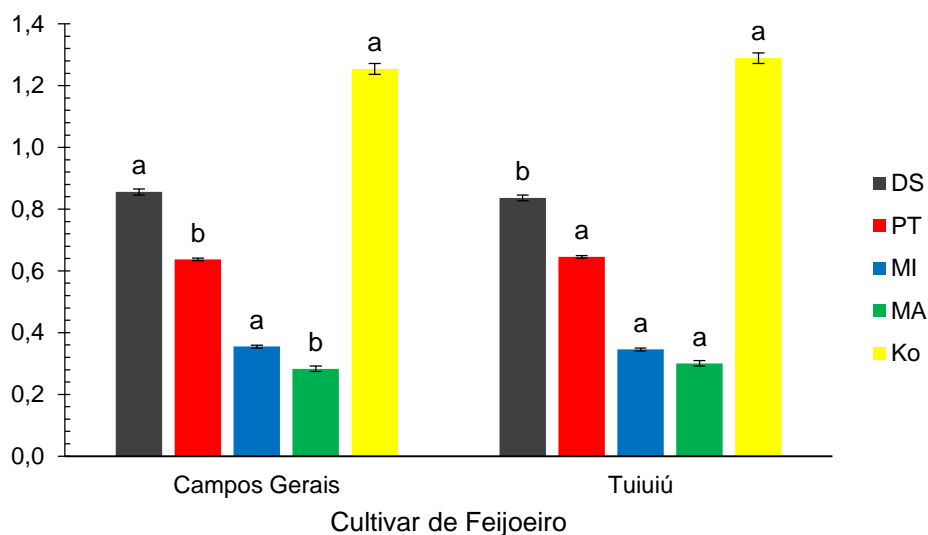


Figura 20 – Densidade do solo (DS, g cm⁻³), porosidade total (PT, cm³ cm⁻³), macroporosidade (MA, cm³ cm⁻³), microporosidade (MI, cm³ cm⁻³) e condutividade hidráulica (K₀, cm s⁻¹) (valores transformados) sob a influência do fator cultivar de plantas de feijoeiro sob condições de ambiente protegido. Letras diferentes para o mesmo atributo físico do solo diferem estatisticamente entre si pelo teste S-N-K (p<0,05).

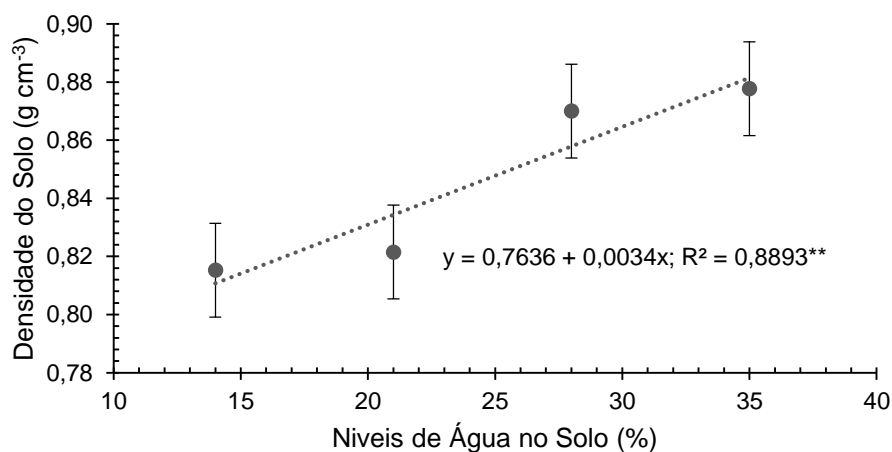


Figura 21 – Densidade do solo (g cm⁻³) em função dos níveis de suprimento de água no solo sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.

Como o solo preenchido nos canteiros não possuía estrutura, a ação dos ciclos de umedecimento e secamento favoreceram o re-arranjo dos microagregados do solo contribuindo para um aumento da DS para os diferentes níveis de umidade (SARMAH et al., 1996; LI et al., 2004).

Outro fator que pode explicar esta resposta diferenciada são possíveis diferenças na distribuição de raízes no volume de solo explorado pelos diferentes genótipos estudados. Provavelmente a profundidade efetiva das raízes afetou consideravelmente a estruturação do solo mediante a ação dos ciclos de umedecimento e secamento ao longo da estação de crescimento das plantas.

Pires e Bacchi (2010), avaliando o comportamento de amostras deformadas de solo submetidas a diferentes ciclos de umedecimento e secamento, verificaram um aumento na DS com o crescente número de ciclos de umedecimento e secamento. Este incremento em DS foi devido ao assentamento das partículas do solo após ação dos ciclos de umedecimento e secamento (BRESSION e MORAN, 1995). A aplicação de apenas um ciclo de umedecimento e secamento já é suficiente para causar mudanças significativas na estrutura do solo.

A PT esteve também condicionada ao fator cultivar (Tabela 8), sendo que para o genótipo Tuiuiú o referido atributo físico do solo foi superior a do cultivar Campos Gerais (Figura 20). A PT correlacionou-se negativa e linearmente com o suprimento de água no solo, denotando que os ciclos de umedecimento e secamento afetam o espaço poroso do solo (Figura 22). O maior valor de PT obtido foi de $0,66 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ sob o nível de água no solo de 14% e o menor de $0,63 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ sob o conteúdo volumétrico de água no solo de 35%. A sequência de ciclos de umedecimento e secamento pode conduzir a um rearranjo das partículas e microagregados do solo, pois durante estes processos as partículas entram em contato com outras se ligando entre si, e modificando o sistema poroso como um todo (SARTORI et al., 1985; PIRES et al., 2008).

A distribuição de raízes em dado volume de solo pode interferir sobre PT e explicar a razão pela qual se observou efeito de genótipo de feijoeiro sobre o comportamento deste atributo físico do solo. Pires e Bacchi (2010), avaliando o comportamento de amostras de solos deformadas submetidas a ciclos de umedecimento e secamento por meio da tomografia computadorizada de raios gama, observaram maior frequência de menores valores de porosidade com o crescente número de ciclos de umedecimento e secamento. Sartori et al. (1985) e Pagliai et al. (1987), analisando a influência de ciclos de umedecimento e secamento sobre a PT de solos coletados a campo, verificaram que tais ciclos promoveram aumento na PT. Pires et al. (2005a), avaliando o comportamento da estrutura do solo em amostras submetidas a diferentes ciclos de umedecimento e secamento

também observaram um aumento na PT com a crescente elevação do número desses ciclos.

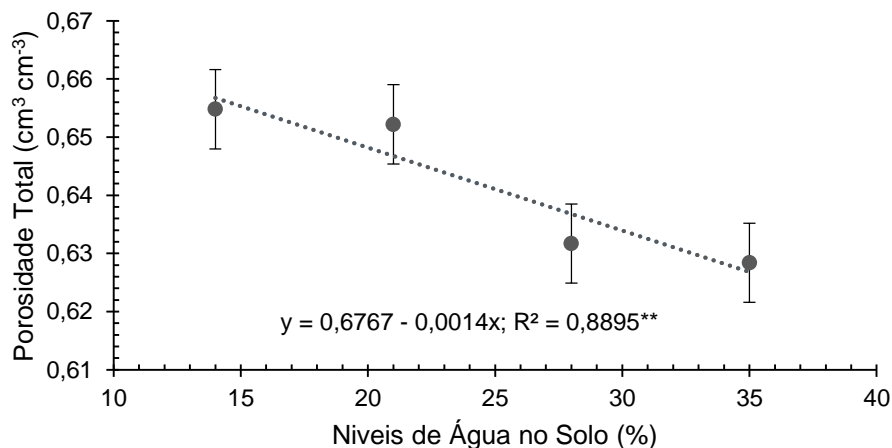


Figura 22 – Porosidade total (cm³ cm⁻³) do solo em função dos níveis de suprimento de água no solo sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.

A MA foi significativamente afetada pelo fator cultivar (Tabela 8). O solo cultivado com feijoeiro Tuiuiú apresentou maior MA em relação aquele cultivado com Campos Gerais (Figura 20). Sob os níveis de água estudados observa-se que há uma correlação linear negativa entre MA e os níveis de suprimento de água no solo (Figura 23). Os valores extremos de MA foram 0,33 cm³ cm⁻³ (14%) e 0,25 cm³ cm⁻³ (35%), respectivamente.

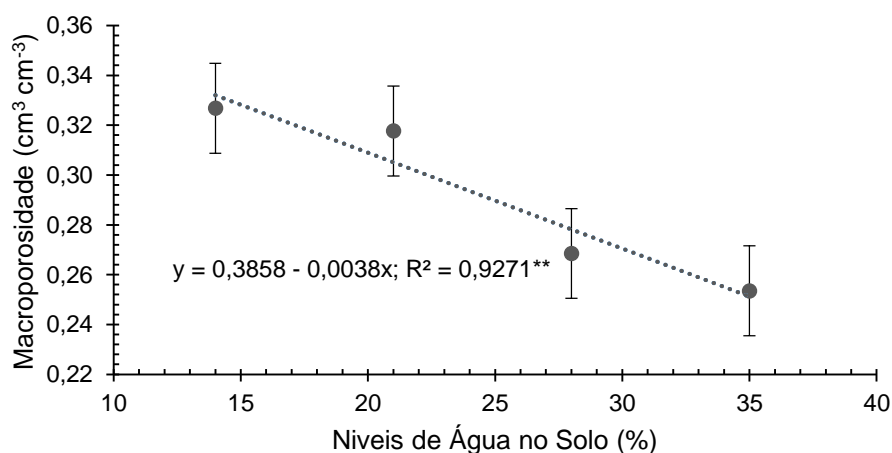


Figura 23 – Macroporosidade (cm³ cm⁻³) do solo em função dos níveis de suprimento de água no solo sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.

Da mesma forma como se observa para MA, a MI correlacionou-se linearmente com a umidade do solo, porém de forma positiva, tendo sido o maior e o menor valores de $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (35%) e $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (14%), respectivamente (Figura 24). Os tratamentos com maiores teores de água no solo apresentaram maior número de ciclos de umedecimento e secamento e proporcionaram, dessa forma, um maior re-arranjo das partículas do solo e significativa redução na proporção de macroporos com elevação no número de microporos.

Pires e Bacchi (2010) verificaram um aumento da densidade das camadas de solo após a ação de ciclos de umedecimento e secamento em amostras deformadas. Neste estudo os autores consideraram quatro tratamentos de 0, 1, 2 e 3 ciclos de umedecimento e secamento. Os ciclos afetaram principalmente os atributos físicos PT, MA e MI como evidenciado pelos autores na análise da distribuição de porosidades. Pires et al. (2005b), analisando crescentes números de ciclos de umedecimento e secamento, encontraram um aumento subsequente em microporos e mesoporos. Phogat e Aylmores (1989) encontraram redução na macroporosidade após ciclos de umedecimento do solo e seu subsequente secamento. Os macroporos são geralmente mais sensíveis quanto a deformação do solo comparado aos microporos devido a menor rigidez dos poros (KUTÍLEK et al., 2006).

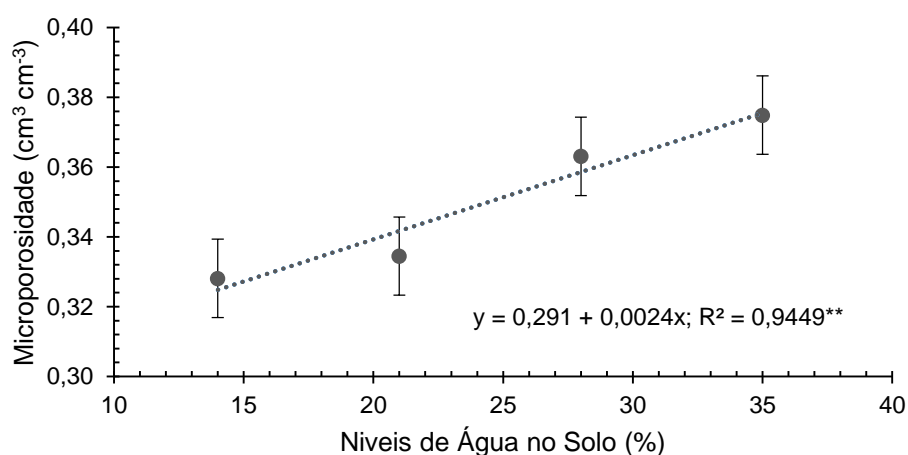


Figura 24 – Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) do solo em função dos níveis de suprimento de água no solo sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.

A K_0 apresentou na análise de correlação tendência quadrática em função dos níveis de água no solo (Figura 25). O teor de água do solo de 21% apresentou maior

valor não transformado para esse atributo físico, tendo sido da ordem de $0,027 \text{ cm s}^{-1}$. O seu menor valor não transformado obtido sob o nível de água no solo de 14% foi de $0,013 \text{ cm s}^{-1}$. Porém, no presente estudo observa-se que a K_0 não apresentou comportamento linear decrescente com os níveis de água no solo, podendo este fato ser explicado pela falta de estrutura das amostras de solo.

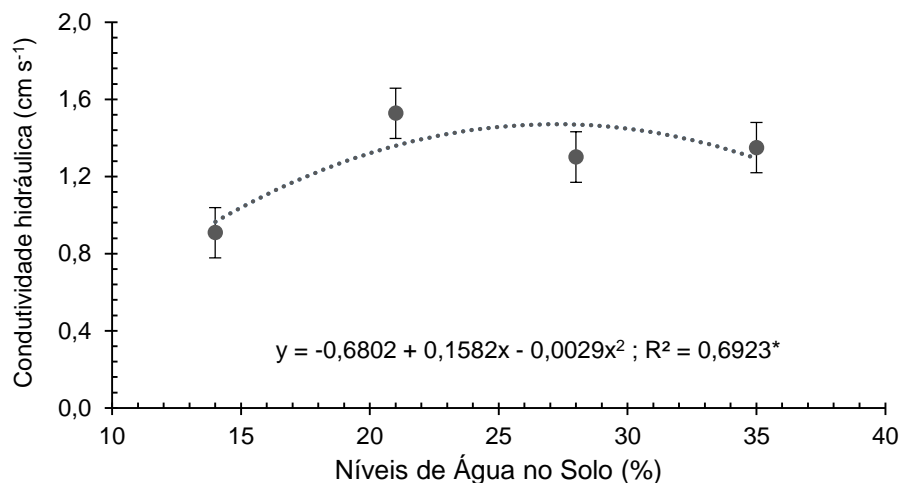


Figura 25 – Condutividade hidráulica (cm s^{-1}) em função dos níveis de água no solo (valores transformados) sob as condições climáticas de ambiente protegido no município de Ponta Grossa, PR.

Na Tabela 10 são apresentadas as correlações lineares simples entre os atributos físicos do solo obtidos após o cultivo do feijoeiro em ambiente protegido. As correlações entre os atributos físicos do solo foram significativas para DS x PT ($r = -0,999^{**}$), DS x MA ($r = -0,9904^{**}$), DS x MI ($0,9738^{**}$), PT x MA ($r = 0,9904^{**}$), PT x MI ($-0,9738^{**}$) e MA x MI ($r = -0,9959$).

A relação inversa entre DS x PT atestou que, com o aumento da DS, ocorrerá uma redução na PT, o que está de acordo com Basso et al. (2011) e Montanari et al. (2013). As demais relações lineares envolvendo a DS foram direta e inversa em relação a MI e MA, respectivamente. Essas duas associações, DS x MA e DS x MI, demonstram que com o aumento da DS uma maior quantidade de microporos é obtida em relação à quantidade de macroporos em virtude do adensamento do solo pelos ciclos de umedecimento e secamento.

A PT apresentou uma associação crescente e decrescente com MA e MI, respectivamente, demonstrando que aumento na quantidade de macroporos está relacionada com uma maior PT. O confronto entre MA e MI demonstra que há uma correlação negativa entre ambas, evidenciando obviamente que quanto maior a

quantidade de macroporos de um solo, menor será a quantidade de microporos que o solo apresenta e vice-versa (HILLEL, 1998).

Tabela 10 – Coeficientes de correlação entre densidade do solo (DS, g cm⁻³), porosidade total (PT, cm³ cm⁻³), macroporosidade (MA, cm³ cm⁻³), microporosidade (MI, cm³ cm⁻³) e condutividade hidráulica (K₀, cm s⁻¹).

	PT	MA	MI	K ₀
DS	-0,9999**	-0,9904**	0,9738**	0,1384 ^{ns}
PT		0,9904**	-0,9738**	-0,1384 ^{ns}
MA			-0,9959**	-0,1509 ^{ns}
MI				0,1575 ^{ns}

ns: não significativo; * e **: significativo a 5% e 1% de confiabilidade pela correlação de Pearson.

5.4.2 Curva de retenção de água (CRA) e curva de distribuição de poros (CDP)

Nesta seção são apresentadas as CRAs (Figuras 26 e 27) ajustadas pelo modelo matemático de van Genuchten (1980) (Tabela 11) e as CDPs derivadas dos dados de retenção de água (Figuras 28 e 29) para os dois cultivares de feijoeiro e os quatro níveis de suprimento de água no solo. Os valores de umidade volumétrica obtidos para os diferentes potenciais mátricos aplicados no solo são apresentados na Tabela 12.

Tabela 11 – Parâmetros das equações ajustadas da curva de retenção de água para cada cultivar e nível de água no solo.

Cultivar	Nível de Água (%)	θ_s	θ_r	α	n	R ²
Campos Gerais	35	0,63261	0,29288	1,4602	1,6596	0,99993
	28	0,62569	0,27823	1,4595	1,6053	0,99975
	21	0,64676	0,26497	1,9417	1,6762	0,99992
	14	0,64536	0,26131	2,3911	1,5935	0,99982
Tuiuiú	35	0,66284	0,29159	1,7267	1,6226	0,99989
	28	0,65902	0,26099	2,8595	1,4987	0,99990
	21	0,65899	0,21827	2,8309	1,4831	0,99981
	14	0,66286	0,23536	2,7857	1,5739	0,99990

Tabela 12 – Conteúdo volumétrico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) obtido após aplicação de cada potencial mátrico.

Potencial mátrico (cm)	Campos Gerais				Tuiuiú			
	35	28	21	14	35	28	21	14
0	0,6326	0,6258	0,6468	0,6453	0,6629	0,6590	0,6590	0,6629
-10	0,5161	0,5116	0,4823	0,4726	0,5225	0,4822	0,4676	0,4571
-20	0,4502	0,4515	0,4113	0,4068	0,4562	0,4242	0,4065	0,3923
-40	0,3975	0,3947	0,3601	0,3627	0,4013	0,3787	0,3539	0,3419
-50	0,3837	0,3807	0,3470	0,3501	0,3878	0,3666	0,3396	0,3293
-60	0,3728	0,3696	0,3370	0,3402	0,3770	0,3567	0,3288	0,3191
-70	0,3643	0,3607	0,3286	0,3317	0,3680	0,3482	0,3198	0,3107
-80	0,3589	0,3555	0,3231	0,3257	0,3625	0,3431	0,3142	0,3063
-90	0,3546	0,3515	0,3201	0,3233	0,3590	0,3398	0,3110	0,3030
-100	0,3518	0,3488	0,3178	0,3209	0,3563	0,3374	0,3084	0,3006

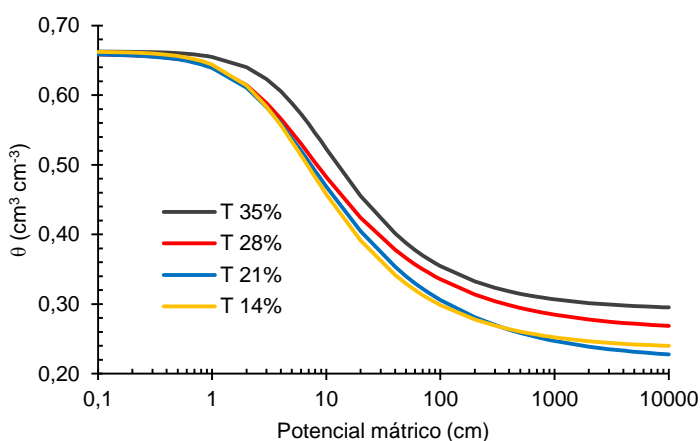
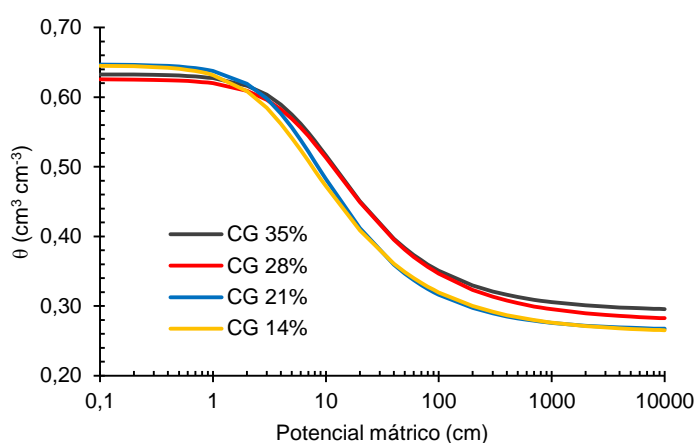


Figura 26 – Curvas de retenção de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) no solo comparando o desempenho entre os níveis de água no solo para cada cultivar de feijoeiro em ambiente protegido. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.

Para o cultivar Campos Gerais pode ser verificado nas CRAs maior retenção de água na região de poros maiores próximos a saturação para os menores níveis de água (14% e 21%) (Figura 26). A retenção de água para esses tratamentos foi

praticamente a mesma para toda a região da CRA, o que indica efeitos similares dos ciclos de umedecimento e secamento com relação à retenção de água. Nas regiões de menor potencial mátrico os tratamentos com maiores níveis de água (28% e 35%) apresentaram uma maior retenção de água, o que está coerente com os maiores valores de microporosidade encontrados em virtude do assentamento dos microagregados e partículas do solo em função dos ciclos de umedecimento e secamento (PIRES e BACCHI, 2010; OGUNWOLE et al., 2015). Para esses tratamentos as CRAs foram similares indicando o mesmo efeito dos ciclos de umedecimento e secamento no sistema poroso do solo (PILLAI-MCGARRY e COLLIS-GEORGE, 1990).

Para o cultivar Tuiuiú não foram observadas diferenças na retenção de água nos valores mais altos de potencial mátrico entre os tratamentos (Figura 26). Porém, para a região mais seca da CRA os resultados de retenção de água foram similares aos observados para o cultivar Campos Gerais, ou seja, maior retenção de água para os maiores níveis de água no solo. Esse resultado está coerente com os maiores valores de microporosidade encontrados para os maiores níveis de suprimento de água. Os valores praticamente iguais de retenção de água próximos à saturação estão principalmente relacionados com as diferenças tênues observadas na porosidade total do solo.

Os menores níveis de água (14% e 21%) apresentaram CRAs praticamente iguais indicando o mesmo efeito desses tratamentos na retenção de água. Com relação aos outros tratamentos (28% e 35%) foram observadas diferenças nas CRAs com uma maior retenção de água para o nível de água de 35% em relação ao de 28%. Acredita-se que o sistema radicular dos diferentes cultivares de feijoeiro pode explicar parte dos resultados obtidos no particular a interferência da planta sobre os atributos físicos do solo. Diferenças na distribuição radicular e profundidade efetiva das raízes, embora não tivessem sido avaliadas no presente estudo, podem proporcionar efeitos importantes advindos do desenvolvimento do sistema radicular da cultura sobre a estrutura do solo.

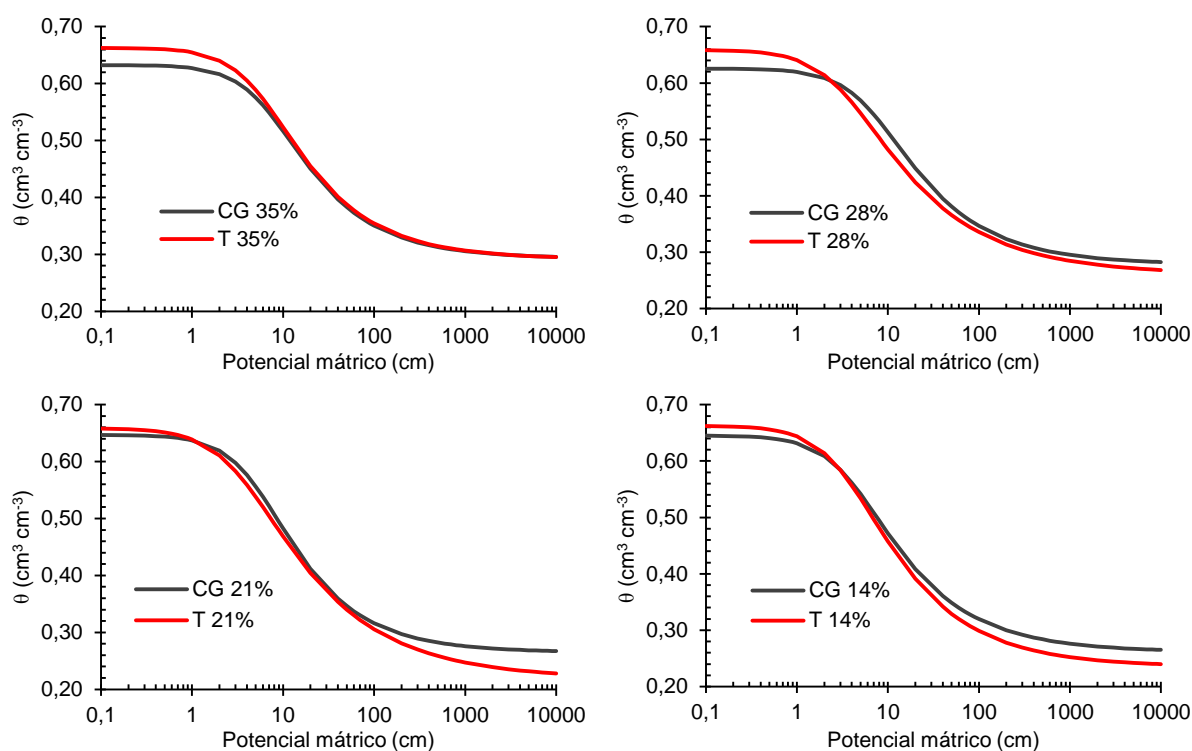


Figura 27 – Curvas de retenção de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) no solo comparando o desempenho entre as cultivares de feijoeiro para cada nível de água no solo em ambiente protegido. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.

Na comparação dos cultivares foi observado que para o nível de água de 35% existem diferenças na CRA somente para a região de mais alto potencial mátrico (Figura 27). Este resultado mostra que após a ação dos ciclos de umedecimento e secamento o assentamento das partículas e microagregados do solo foi similar para os dois cultivares de feijoeiro. Isso demonstra que os efeitos do sistema radicular, no sistema poroso do solo, devido à influência dos diferentes cultivares de feijoeiro foram praticamente os mesmos.

Para o nível de água de 28% as CRAs também são praticamente iguais com diferenças pequenas na região de poros maiores (Figura 27). Porém, para as regiões de mais baixo potencial mátrico a retenção de água é praticamente a mesma entre os cultivares de feijoeiro. Novamente tal resultado está relacionado com a ação dos ciclos de umedecimento e secamento no assentamento das partículas e microagregados do solo.

Para os níveis de umidade de 14% e 21% foram observadas diferenças maiores na retenção de água, entre os cultivares de feijoeiro, nas regiões de menor potencial mátrico (Figura 27). O cultivar Campos Gerais apresenta maior retenção de água para os poros menores, podendo ser indicação de menores valores de

microporosidade para o solo sob esse cultivar em associação com possíveis efeitos da matéria orgânica incorporada ao solo pela cultura. Entretanto, é válido frisar que o efeito da matéria orgânica pode não ser tão significativo devido a seu tempo de incorporação no solo.

As amostras de solo submetidas a maiores níveis de água apresentaram uma maior MI, o que está relacionado a uma maior retenção de água em sua matriz principalmente nas regiões de baixo potencial mátrico, como já discutido. Os solos submetidos a menores níveis de suprimento de água apresentaram maior MA, sendo desta forma mais fácil a sua drenagem quando comparado a de um solo com maior suprimento de água. Isso é evidenciado nas CRAs apresentadas para os diferentes cultivares de feijoeiro e níveis de água. Dessa maneira, as diferenças na retenção de água para os diferentes potenciais mátricos analisados comprovam as mudanças na distribuição de diâmetro de poros desses solos (HILLEL, 1980).

É válido ressaltar que a retenção de água no solo é influenciada principalmente pela textura, estrutura e conteúdo de carbono orgânico do solo (GIAROLA et al., 2002; DEXTER et al., 2004; SEVERIANO et al., 2010). De acordo com Rawls et al. (1991), a retenção de água sob altos potenciais mátricos ocorre pelo processo de capilaridade, sendo, desta forma, muito alterada pelo arranjo das partículas, devido a presença de poros estruturais. Por outro lado, com a redução da umidade do solo a granulometria e a mineralogia tornam-se importantes, devido à maior superfície específica para a adsorção das moléculas de água (GUPTA e LARSON, 1979; MACHADO et al., 2008).

Na Figura 28 são apresentadas as CDPs para os quatro diferentes níveis de suprimento de água para cada cultivar.

Para o cultivar de feijoeiro Campos Gerais o que se observa é uma maior frequência de poros para os menores níveis de água no solo (Figura 28). Também pode ser verificado um deslocamento no poro mais frequente para as regiões de raios de poros maiores sob os menores níveis de água no solo. Esses resultados estão diretamente relacionados com os valores de DS, PT, MA e MI medidos (CÁSSARO et al., 2008; OGUNWOLE et al., 2015). Observa-se que para os maiores níveis de água (28% e 35%) não existem diferenças na CDP, o que indica que o tratamento de 28% já causou efeitos similares na estrutura do solo em relação ao tratamento de 35%.

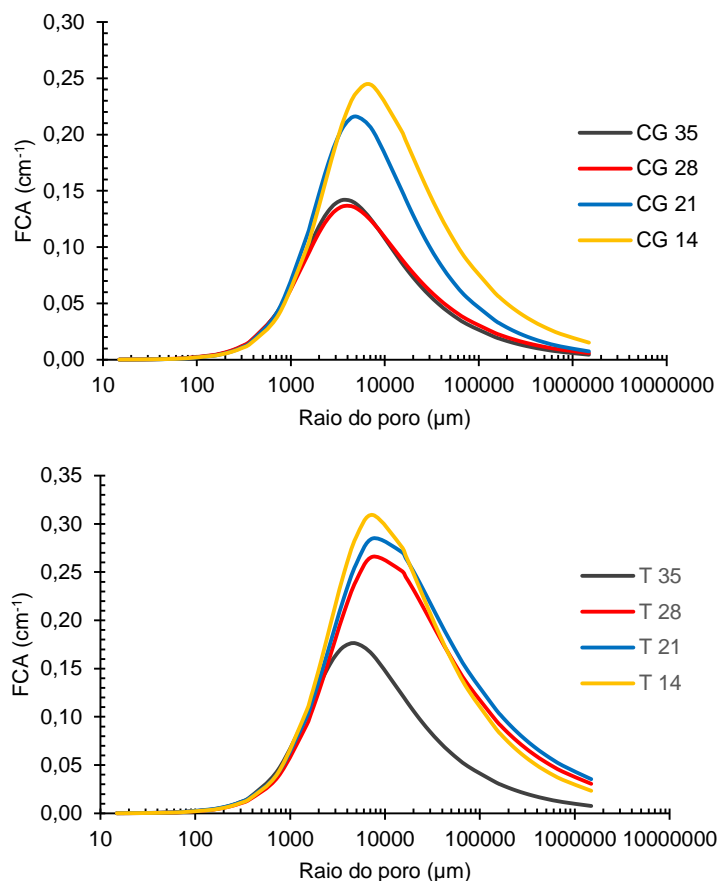


Figura 28 – Curvas de distribuição de poros no solo em função do potencial matricial comparando o desempenho entre os níveis de água no solo para cada cultivar de feijoeiro em ambiente protegido. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.

Para o cultivar Tuiuiú, sob os níveis de água de 14%, 21% e 28%, verifica-se que o valor mais frequente de raio de poro é praticamente o mesmo e com deslocamento para raios maiores em relação ao tratamento de 35% (Figura 28). Um resultado similar ao cultivar de feijoeiro Campos Gerais foi observado para o Tuiuiú, com uma maior frequência de poros para os menores níveis de água. No entanto, tem sido observado para o caso do Tuiuiú que existe uma CDP com diferenças tênues sob os menores níveis de suprimento de água 14%, 21% e 28% em relação ao Campos Gerais, principalmente em relação ao tratamento de 35%. Esse resultado indica um efeito diferencial do cultivar de feijoeiro na distribuição de tamanho dos poros do solo, embora tal resultado não tenha ficado tão evidente nas CRAs.

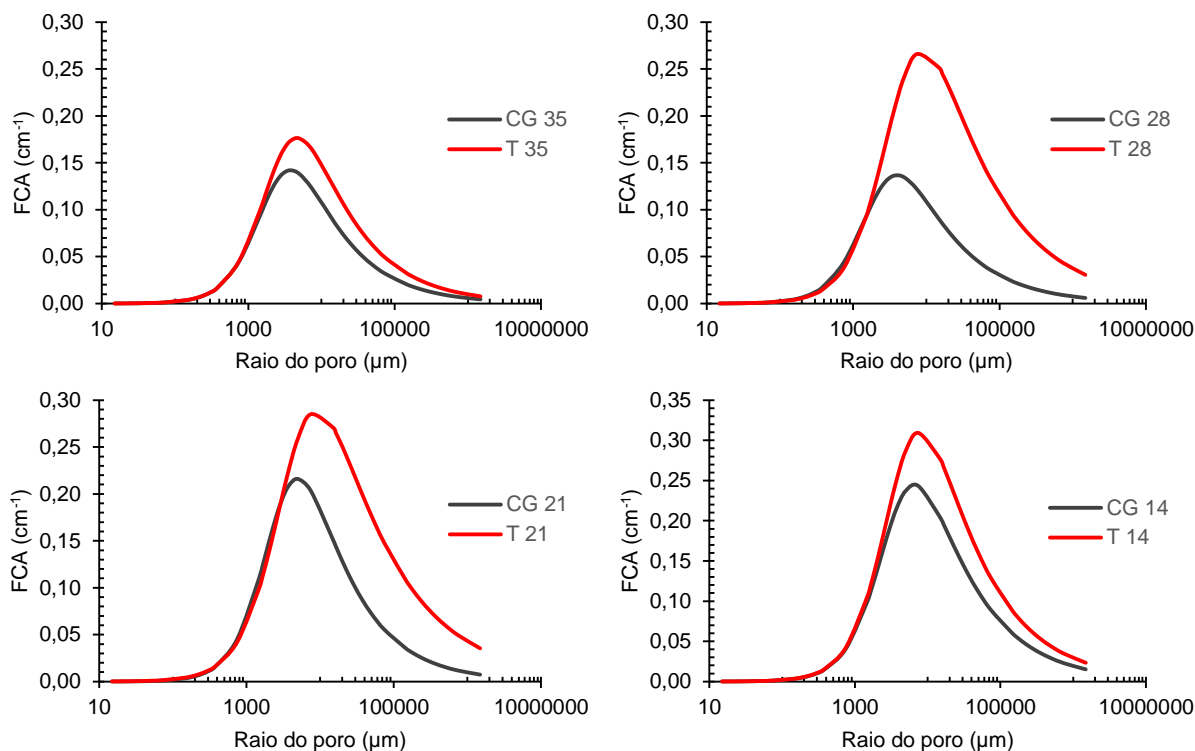


Figura 29 – Curvas de distribuição de poros no solo em função do potencial matricial comparando o desempenho entre os cultivares de feijoeiro para cada nível de água no solo em ambiente protegido. CG: Campos Gerais. T: Tuiuiú.

Com relação à comparação entre os cultivares e diferentes níveis de água no solo, o que se observa para o tratamento de 35% é uma similaridade entre as CDPs, com valores de raios de poros mais frequentes praticamente iguais e uma frequência de poros levemente superior para o Tuiuiú (Figura 29). No caso do tratamento 28% o cultivar Tuiuiú apresentou frequência de poros maior do que aquela encontrada para o cultivar Campos Gerais. Também houve um deslocamento mais pronunciado do pico mais frequente para regiões de poros maiores. Resultado semelhante foi obtido para os tratamentos de 21% e 14%, embora com diferenças mais tênues para o tratamento 14% com relação à frequência de poros.

Os resultados observados para 14% e 35% podem ser explicados pelo fato de que o menor nível de água ainda não é suficiente para ocasionar diferenças significativas na distribuição de poros, devido à quantidade de ciclos de umedecimento e secamento. É válido lembrar que o solo utilizado no experimento foi peneirado e depois depositado no local do experimento. Já para o maior nível de água, devido ao maior número de ciclos de umedecimento e secamento, ocorre um maior assentamento e re-arranjo das partículas e microagregados do solo. Isso faz com que as CDPs sejam praticamente as mesmas.

5.5 CORRELAÇÕES ENTRE COMPONENTES DE RENDIMENTO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Na Tabela 13 são apresentadas as correlações lineares simples entre os atributos físicos do solo e os componentes de rendimento do feijoeiro cultivado sob condição de ambiente protegido. As correlações entre os atributos físicos do solo e os componentes de rendimento foram significativamente elevadas para DS x MGP ($r = 0,8178^*$), PT x MGP ($r = -0,8178^*$), MA x NVP ($0,8119^*$), MA x MGP ($r = 0,8759^{**}$), MI x NVP ($-0,7592^*$) e MI x MGP ($r = -0,8583^{**}$).

A correlação positiva entre DS x MGP e negativa entre PT x MGP indica que com o aumento da DS e a redução da PT, a MGP aumenta em função desses atributos físicos do solo. Os componentes de rendimento da cultura do feijoeiro NVP e MGP correlacionaram-se positivamente com a MA. Para a MI, o NVP e a MGP correlacionaram-se negativamente com o referido atributo físico do solo. Assim, quanto maior MA e menor MI, melhor será o desempenho fisiológico e fitotécnico da cultura estudada sob condição de ambiente protegido. Um solo com maior densidade possui menor macroporosidade e maior microporosidade (SILVA et al., 2000) e as raízes das plantas têm dificuldades de crescer e de se desenvolver nesses pequenos poros (SCHENK e BARBER, 1979).

As associações envolvendo o NGV e a MCG com todos os atributos físicos do solo foram fracas e inconsistentes, demonstrando haver nenhuma relação de dependência entre esses componentes de rendimento da cultura e os atributos físicos do solo. A condutividade hidráulica não apresentou correlação alguma com os componentes de rendimentos avaliados sob as condições ambientais estudadas. Suzuki et al. (2007), afirmam que um K_0 de $17,38 \text{ mm h}^{-1}$ é um valor mínimo em um Argissolo para que as plantas apresentem um bom desenvolvimento. Esse valor de K_0 corresponde a uma macroporosidade de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo considerado por Vomocil e Flocker (1966) como sendo o limiar crítico para crescimento satisfatório das plantas.

Montanari et al. (2013) obtiveram correlações fracas para as interações DS x NVP ($r = 0,069^{ns}$) e DS x MGP ($r = -0,187^*$) sob condições de campo, ao contrário do que foi observado no presente estudo sob ambiente protegido. Os referidos autores obtiveram ainda correlações mais fracas para as interações PT x NVP ($-0,093^{ns}$) e PT x MGP ($0,200^*$), corroborando nossos resultados para PT x NVP e discordando do que obtivemos para PT x MGP.

Tabela 13 – Coeficientes de correlação entre os componentes de rendimento do feijoeiro e dos atributos físicos do solo.

	DS	PT	MA	MI	K ₀
NVP	0,6671 ^{ns}	-0,6671 ^{ns}	0,8119*	-0,7592*	0,1049 ^{ns}
NGV	0,1970 ^{ns}	-0,1970 ^{ns}	0,1080 ^{ns}	-0,1442 ^{ns}	-0,4729 ^{ns}
MGP	0,8178*	-0,8178*	0,8759**	-0,8583**	-0,1483 ^{ns}
MCG	-0,0801 ^{ns}	0,0801 ^{ns}	-0,2032 ^{ns}	0,1553 ^{ns}	0,1116 ^{ns}

ns: não significativo; * e **: significativo a 5% e 1% pela correlação de Pearson.

6 CONCLUSÕES

A umidade do solo dentro dos níveis estipulados no presente estudo não afetou integralmente a resposta fisiológica dos genótipos de feijoeiro cultivados em ambiente protegido. No entanto, o comportamento fitotécnico da cultura durante o sub-período de formação da produção foi condicionado pelo “status” de água no solo.

A massa de cem grãos do cultivar Tuiuiú foi mais elevada do que aquela observada no cultivar Campos Gerais, evidenciando efeito de genótipos sobre a resposta fisiológica do feijoeiro.

O número de vagens por planta e a massa de grãos por planta não foram condicionados pelos genótipos de feijoeiro submetidos a diferentes regimes de suprimento de água no solo. Porém, ambos componentes de rendimento da cultura estiveram fortemente correlacionados entre si e foram afetados pelas condições hídricas.

A umidade do solo exerceu influência sobre os atributos físicos do solo e o fator cultivar de feijoeiro afetou a densidade do solo, a porosidade total e a macroporosidade.

A densidade do solo e a microporosidade correlacionaram-se positiva e linearmente com as condições hídricas do solo, ao passo que a porosidade total e a macroporosidade diminuíram linearmente com a intensificação do déficit hídrico.

A densidade do solo sob o cultivo do cultivar Campos Gerais foi maior do que aquela observada para o cultivar Tuiuiú. A porosidade total e a macroporosidade do solo cultivado com Tuiuiú foram mais elevadas do que aquelas obtidas para Campos Gerais.

A densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade do solo proporcionaram variação significativa no número de vagens por planta, bem como, na massa de grãos por planta de ambos os cultivares de feijoeiro.

A condutividade hidráulica do solo não apresentou correlação alguma com os componentes de rendimento e não foi governada pelos genótipos de feijoeiro cultivados sob condições de ambiente protegido.

O cultivar Campos Gerais apresentou maior retenção de água na região próxima à saturação sob os conteúdos volumétricos de água no solo de 35 e 28%,

ao passo que o cultivar Tuiuiú sob os mesmos limiares de água não apresentou resposta diferenciada quanto à retenção hídrica. Na região de maiores potenciais mátricos os maiores níveis de suprimento de água apresentaram maior retenção para ambos cultivares.

O cultivar Tuiuiú revelou maior retenção de água sob potenciais mátricos próximos à saturação para todos os níveis de umidade do solo. Para potenciais mátricos mais negativos o cultivar Campos Gerais apresentou maior retenção, exceto sob umidade do solo de 35% em base de volume para ambos os cultivares.

O crescimento e o desenvolvimento dos genótipos de feijoeiro cultivados em solo assentado sobre canteiros no ambiente protegido não promoveram mudanças nas curvas de retenção de água.

A curva de distribuição de poros caracterizou mudanças na estrutura do solo, a qual foi afetada pelas condições hídricas do solo.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, F. A.; SÁ, M. E. de; SOUZA, L. C. D. de; SILVA, M. P. da; SIMIDU, H. M.; ANDREOTTI, M.; BUZETTI, S.; VALÉRIO FILHO, W. V.; ARRUDA, N. Uso do regulador de crescimento em cultivares de feijão de inverno. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 21, p. 148-154, 2011.
- AGUIAR, R. S. de; MODA-CIRINO, V; FARIA, R. T.; VIDAL, H. I. V. Avaliação de linhagens promissoras de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes ao déficit hídrico. **Semina**, Londrina, v. 29, n. 1, p. 1-14, 2008.
- AMINIFAR, J.; MOHSENABADI, Gh.; BIGLOUEI, M. H.; SAMIEZADEH, H. Effect of deficit irrigation on yield, yield components and phenology of soybean cultivars in Rasht region. **International Journal of AgriScience**, v. 2, n. 2, p. 185-191, 2012.
- AMORIM, E. P.; RAMOS, N. P.; UNGARO, M. R. G.; KIIHL, T. A. M. Correlações e análise de trilha em girassol. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, p. 307-316, 2008.
- ANDRIOLO, J. L. **Fisiologia das culturas protegidas**. Santa Maria: UFSM, 1999. 142 p.
- ARAÚJO, J. S.; ANDRADE, A. P. de; RAMALHO, C. I.; AZEVEDO, C. A. V. de. Características de frutos de pimentão cultivado em ambiente protegido sob doses de nitrogênio via fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 152-157, 2009.
- ARGENTA, G.; SANGOI, L.; SILVA, P. R. F. da; RAMPAZZO, C.; GRACIETTI, L. C.; STRIEDER, M. L.; SUHRE, E. L. F. E. Potencial de rendimento de grãos de milho em dois ambientes e cinco sistemas de produção. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 4, n. 1-2, p. 27-34, 2003.
- ASAWA, G. L. **Irrigation and Water Resources Engineering**. Nova Delhi: New age International Publishers, 2008. 608 p.
- AZEVEDO, J. A.; CAIXETA, T. J. Irrigação do feijoeiro. Planaltina: EMBRAPA/CPAC, 1986. (EMBRAPA/CPAC, 20).
- BANNAYAN, M.; SANJANI, S. Weather conditions associated with irrigated crops in an arid and semi-arid environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p. 1589-1598, 2011.
- BARBANO, M. T. **Riscos climáticos e épocas de semeadura para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Carioca) na safra das águas no Estado de São Paulo**. 2003, 93 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo de Campinas – IAC, 2003.

BASCUR, G.; OLIVA, M. A.; LAING, D. Termometria infrarroja en seleccion de genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) resistentes a sequia. II. Crecimiento y productividad. **Turrialba**, São José, v. 35, p. 49-53, 1985.

BASSO, F. C.; ANDREOTTI, M.; CARVALHO, M. de P. e; LODO, B. N. Relações entre produtividade de sorgo forrageiro e atributos físicos e teor de matéria orgânica de um Latossolo do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 135-144, 2011.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; SANTOS, A. O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1531-1540, 2000.

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

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; MENGATTO, L. H.; MENGATTO, L. H.; ALVES, J. B.; WAGNER, G. P. C. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 359-364, 2009.

BEZERRA, A. P. A.; PITOMBEIRA, J. B.; TÁVORA, J. A. F.; VIDAL NETO, F. das C. Rendimento, componentes da produção e uso eficiente da terra nos consórcios sorgo x feijão-de-corda e sorgo x milho. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza. v. 38, n. 1, p. 104-108, 2007.

BLUM, A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential - are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 56, p. 1159-1168, 2005.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; CONTE, O.; OLIVEIRA, E. S.; LEVIEN, R. Equipamento para coleta de amostras indeformadas de solo para estudos em condições controladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1929-1934, 2009.

BRESSON, L. M.; MORAN, C. J. Structural change induced by wetting and drying in seed beds of a hard setting soil with contrasting aggregate size distribution. **European Journal of Soil Science**, v. 46, p. 205-214.

BULISANI, E. A.; ALMEIDA, L. D. A. de; ROSTON, A. J. A cultura do feijoeiro no Estado de São Paulo. In: BULISANI, E. A. **Feijão: fatores de produção e qualidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 29-88.

CALVACHE, A. M.; REICHARDT, K.; MALAVOLTA, R.; BACCHI, O. O. S. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do

uso de água em uma cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, n. 3, p. 481-488, 1997.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, 1997. 132 p.

CARAMORI, P. H.; GONÇALVES, S. L.; FARIA, R. T.; CAVIGLIONE, J. H.; OLIVEIRA, D.; GALDINO, J.; PUGSLEY, L.; WREGE, M. S. **Zoneamento agrícola do Estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agrônômico do Paraná, 2003. 76 p.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. da C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 77-86, 2011.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: Água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

CARVALHO, C. G. P.; ARIAS, C. A. A.; TOLEDO, J. F. F. de; OLIVEIRA, M. F. de; VELLO, N. A. Correlação e análise de trilha em linhagens de soja semeadas em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 311-320, 2002.

CARVALHO, J. J.; SAAD, J. C. C.; CUNHA, F. N.; SILVA, N. F. da; TEIXEIRA, M. B. Manejo da Irrigação no Feijoeiro, Cultivado em Semeadura Direta e Convencional. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n. 1, p. 52-63, 2014.

CARVALHO, L. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho Amarelo, não-saturado, utilizando-se sonda de nêutrons. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 153-159, 2010.

CASAROLI, D.; LIER, Q. de J. van; Critérios para Determinação da Capacidade de Vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 59-66, 2008.

CÁSSARO, F. A. M.; BORKOWSKI, A. K.; PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; SAAB, S. da C. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 111, p. 175-179, 2011.

CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F.; SANTOS, R. A. dos; GIMÉNEZ, D.; REICHARDT, K. Funil de Haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), Viçosa, v. 32, p. 2555-2562, 2008.

CENTRITTO, M.; MAGNANI, F.; LEE, H. S. J.; JARVIS, P. G. Interactive effects of elevated [CO₂] and drought on cherry (*Prunus savium*) seedlings: II. Photosynthetic capacity and water relations. **New Phytologist**, v. 141, p. 141-153, 1999.

CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 701-709, 2000.

CHAVARRIA, G.; DURIGON, M. R.; KLEIN, V. A.; KLEBER, H. Restrição fotossintética de plantas de soja sob variação de disponibilidade hídrica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 8, p. 1387-1393, 2015.

CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. Plant water relations: absorption, transport and control mechanisms. In: MONTANARO, G.; DICHIO, B. (Org.). **Advances in selected plant physiology aspects**. Rijeka: Intech, v. 1, p. 105-132, 2012

COBANER, M. Evapotranspiration estimation by two different neuro-fuzzy inference systems. **Journal of Hydrology**, v. 398, n. 3-4, p. 292-302, 2011.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1663-1674, 2006.

CONAB. **Sexto levantamento de avaliação da safra 2015/2016**. Brasília, 2016. 140 p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_03_11_15_20_36_boletim_graos_marco_2016.pdf>. Acesso em: 21 de abr. de 2016.

COSTA, G. F. da; MARENCO, R. A. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*). **Acta Amazônica**, v. 37, n. 2, p. 229-234, 2007.

CUNHA, P. C. R. da; SILVEIRA, P. M. da; NASCIMENTO, J. L. do; ALVES JUNIOR, J. Manejo da irrigação no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 7, p. 735-742, 2013.

DAL FERRO, N.; SARTORI, L.; SIMONETTI, G.; BERTI, A.; MORARI, F. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil & Tillage Research**, v. 140, p. 55-65, 2014.

DALMAGO, G. A.; HELDWEIN, A. B.; NIED, A. H.; GRIMM, E. L.; PIVETTA, C. R. Evapotranspiração máxima da cultura de pimentão em estufa plástica em função da radiação solar, da temperatura, da umidade relativa e do déficit de saturação do ar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 785-792, 2006.

DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.** Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc. Madison, 2002.

DAVALO, M. J. **Curva de Retenção de Água no Solo Estimado pelo Método da Câmara de Richards e Psicrômetro.** 2013, 48 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2013.

DEBNATH, P.; DEB, P.; SEN, D.; PATTANNAIK, S. K.; SAH, D.; GHOSH, S. K. Physico-chemical properties and its relationship with water holding capacity of cultivated soils along altitudinal gradient in Sikkim. **International Journal of Agriculture Environment & Biotechnology**, v. 5, n. 2, p. 161-166, 2012.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201-214, 2004.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper. n. 33. Rome: FAO, 1979. 193 p.

DRAKE, B. G.; GONZALEZ-MELER, M. A.; LONG, S. P. More eficiente plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 607-637, 1997.

DUNIN, F. X.; ASTON, A. R. The development and proving of models of large-scale evapotranspiration: an Australian study. **Agricultural Water Management**, v. 8, p. 305-323, 1984.

EAMUS, D.; JARVIS, P. G. The direct effects of increase in the global atmospheric CO₂ concentration on natural and commercial temperate trees and forests. **Advances in Ecological Research**, v. 19, p. 1-55, 1989.

EI-SHARKAWY, M. A.; COCK, J. H. PORTO, M. C. M. Características fotossintéticas da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v. 1, p. 143-154, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise do solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

ENKU, T; MELESSE, A. M. A simple temperature method for the estimation of evapotranspiration. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 5, p. 2945-2960, 2014.

EVANGELISTA, A. W. P.; PEREIRA, G. M. Avaliação de dois tipos de evaporímetros na estimativa da demanda evaporativa do ar (ET) no interior de casa de vegetação, em Lavras MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 6, p. 1348-1353, 2003.

FEHR, W. R. **Principles of cultivars development**. New York: Macmillan Publishing Company, 1987. v. 1, 536 p.

FERNÁNDEZ, M. D.; TEZARA, D.; RENGIFO, E.; HERRERA, A. Lack of down-regulation of photosynthesis in a tropical root crop, cassava grown under an elevated CO₂ concentration. **Functional Plant Biology**, v. 29, p. 805-814, 2002.

FERNÁNDEZ-UGALDE, O.; VIRTO, I.; BESCANSÀ, P.; IMAZ, M. J.; ENRIQUE, A.; KARLEN, D. L. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semi-arid soils. **Soil & Tillage Research**, v. 106, p. 29-35, 2009.

FERRAZ, R. L. de S.; MELO, A. S. de; SUASSUNA, J. F.; BRITO, M. E. B. de; FERNANDES, P. D.; NUNES JÚNIOR, E. da S. Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 181-188, 2012.

FIGUEIREDO, M. G. de; PITELLI, M. M.; FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R. Lâmina ótima de irrigação para o feijoeiro considerando restrição de água, em função do nível de aversão ao risco do produtor. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 29, supl. spe, p. 593-598, 2007.

FIGUEIREDO, M. G. de; PITELLI, M. M.; FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R. Lâmina ótima de irrigação para o feijoeiro considerando restrição de água, em função do nível de aversão ao risco do produtor. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 29, supl. spe, p. 593-598, 2007.

FIOREZE, S. L.; PIVETTA, L. G.; FANO, A.; MACHADO, F. R.; GUIMARÃES, V. F. Comportamento de Genótipos de Soja Submetidos a Déficit Hídrico Intenso em Casa de Vegetação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 3, p. 342-349, 2011.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: Ed. da UPF, 2004.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p. 661-669, 1992.

FRIZZONE, J. A. Irrigação por superfície - princípios de operação e manejo. Piracicaba: ESALQ. Departamento de Engenharia Rural, 1992. 82 p. (DER. Série Didática, 4).

FURTADO, M. R.; CRUZ, C. D.; CARDOSO, A. M.; COELHO, A. D. F.; PETERNELLI, L. A. Análise de trilha do rendimento do feijoeiro e seus componentes primários em monocultivo e em consórcio com a cultura do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 217-220, 2002.

GABRIEL, L. F.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; SILVA, M. R. da; SILVA, S. D. da. Mudança climática e seus efeitos na cultura da mandioca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 90-98, 2013.

GARCIA, C. J. B. **Irrigação por gotejamento superficial e subsuperficial na cultura de batata (*Solanum tuberosum* L.) com dois sistemas de plantio**. 2003, 67 p. Dissertação (mestrado) – UNESP, Botucatu, 2003.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 885-893, 2002.

GLINSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil Physical Conditions and Plant Roots**. CRC Press: Boca Raton, 1990, 250 p.

GOLLAN, T.; TURNER, N. C.; SCHULZE, E. D. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. **Oecologia**, v. 65, p. 356-362, 1985.

GOMES, E. P.; ÁVILA, M. R.; RICKLI, M. E.; PETRI, F.; FEDRI, G. Desenvolvimento e produtividade do girassol sob lâminas de irrigação em semeadura direta na região do Arenito Caiuá, Estado do Paraná. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 4, p. 373-385, 2010.

GOMES, P. G.; BISCARO, G. A.; ÁVILA, M. R.; LOOSLI, F. S.; VIEIRA, C. V.; BARBOSA, A. P. Desempenho agrônômico do feijoeiro comum de terceira safra sob irrigação na região Noroeste do Paraná. **Semina**, Londrina, v. 33, n. 3, p. 899-910, 2012.

GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1174-1184, 2013.

GRIGOLON, G. B. **Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número mínimo de pares de umidade e tensão na câmara de Richards**. 2013, 83 f. Dissertação (Mestrado Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz – USP, Piracicaba, 2013.

GUIMARÃES, C. M. **Efeitos fisiológicos do estresse hídrico**. 1998, 205 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, 1998.

GUIMARÃES, C. M.; BRUNINI, O.; STONE, L. F. Adaptação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca (I. Densidade e eficiência radicular). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 6, p. 393-399, 1996.

GUIMARÃES, C. M.; STEINMETZ, S.; PORTES e CASTRO, T. de A. Uso de microlisímetros na determinação da evapotranspiração do feijoeiro da seca. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 1., 1982, Goiânia. **Anais...** Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1982. p. 133-137.

GUIMARÃES, C. M.; ZIMMERMANN, M. J. Deficiência hídrica em feijão. In: REUNION DE TRABAJO SOBRE MEJORAMIENTO EM FRIJOL EN BRASIL COM ENFASIS EM TOLERANCIA A SEQUIA, 1985, Cali. **Anais...** Cali: CIAT, 1985. p. 15-28.

GUOJU, X.; FENGJU, Z.; JUYING, H.; CHENGKE, L.; JING, W.; FEI, M.; YUBI, Y.; RUNYUAN, W.; ZHENGJI, Q. Response of bean cultures' water use efficiency against climate warming in semiarid regions of China. **Agricultural Water Management**, v. 173, p. 84-90, 2016.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, v. 15, p. 1633-1635, 1979.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations**. Academic Press, London, 1998.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. Academic Press, New York, 1980. 413 p.

HIRT, H.; SHINOZAKI, K. **Plant Responses to Abiotic Stress**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its application. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 1-2, p. 137-157, 2000.

HSIAO, T. C. Plant responses to water stress. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 24, p. 519-570, 1973.

IMAI, K.; COLEMAN, D. F.; YANAGISAWA, T. Elevated atmospheric partial pressure of carbon dioxide and dry matter production of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.). **Japan Journal Crop Science**, v. 53, p. 479-485, 1984.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no estado do Paraná. Londrina: IAPAR, 2003. 30 p. (IAPAR. Circular, 128).

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR A. Cartas climáticas do Paraná, 2016. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>>. Acesso em: 22 jun. 2016 a.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR B. Cartas climáticas do Paraná, 2016. Disponível em: <www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/pluvio.xls>. Acesso em: 22 jun. 2016 b.

JAČKA, L.; PAVLÁSEK, J.; PECH, P.; KURÁŽ, V. Assessment of evaluation methods using in- filtration data measured in heterogeneous mountain soils. **Geoderma**, v. 276, p. 74–83, 2016.

JADOSKI, S. O.; KLAR, A. E.; SALVADOR, E. D. Relações hídricas e fisiológicas em plantas de pimentão ao longo de um dia. **Ambiência**, Guarapuava, v. 1, n. 1, p. 11-19, 2005.

KANEMASU, E. T.; TANNER, C. B. Stomatal diffusion resistance of snap beans. I. Influence of leaf water potentials. **Plant Physiology**, v. 44, p. 1547-1552, 1969.

KAPPES, C.; WRUCK, F. J.; CARVALHO, M. A. C. de; YAMASHITA, O. M. Feijão comum: características morfoagronômicas de cultivares. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 9., 2008, Campinas. **Anais...** Campinas: IAC, 2008. p. 506-509.

KASTANEK, F. J.; NIELSEN, D. R. Description of soil water characteristics using a cubic spline interpolation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 2, p. 279–283, 2001.

KERBAUY, G. B., 2004. **Fisiologia Vegetal**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 431 p.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. de P. e; LIMA, G. da R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 361-369, 2007.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ediupf, 2008.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: _____. **Methods of Soil Analysis: I. Physical and Mineralogical Methods**. 2. Ed. Madison: SSSA, 1986. 1358 p. p. 635-662.

KRAMER, P. J.; BOYERS, J. S. Evolution and agriculture water use. In: _____. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. p. 377-404.

KUO, S. F.; FENG, W. C.; LIAO, P. Y.; LIU, C. W. A comparative study on the estimation of evapotranspiration using back propagation neural network: Penman–Monteith method versus pan evaporation method. **Paddy Water Environ**, v. 9, n. 4, p. 413-424, 2011.

KURUVADI, S.; AGUILERA, D. M. Patrones del sistema radicular em frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). **Turrialba**, v. 40, p. 491-498, 1990.

KUTÍLEK, M.; JENELE, L.; PANAYIOTOPOULOS, K. P. The influence of uniaxial compression upon pore size distribution in bi-models oils. **Soil & Tillage Research**, v. 86, p. 27–37, 2006.

KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D. R. **Soil Hydrology**, Catena Verlag, Germany, 1994.

LAFFRAY, D.; LOUGUET, P. Stomatal responses and drought resistance. *Actualités Botaniques*, v. 1, p. 47-60 (Bulletin de La Société Botanique de France, 137)

LAL, R., SHUKLA, M.K. **Principles of Soil Physics**. CRC Press, New York, 2004.

LEMOS, L. M. C.; SANTOS, S. R. dos; LEMOS, J. P. Crescimento do meloeiro Cantaloupe sob manejo de irrigação por gotejamento em Janaúba, Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 5, p. 614-623, 2012.

LI, D.; VELDE, B.; ZHANG, T. Observations of pores and aggregates during aggregation in some clay-rich agricultural soils as seen in 2D image analysis. **Geoderma**, v. 118, p. 191-207, 2004.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo: EdUSP, 2005. 329 p.

LIMA, W. de P.; JARVIS, P.; RHIZOPOULOU, S. Stomatal responses of Eucalyptus species to elevated CO₂ concentration and drought stress. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 231-238, 2003.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, v. 116, p. 107–136, 2003.

LIPIEC, J.; KUŚ, J.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil & Tillage Research**, v. 89, n. 2, p. 210-220, 2006.

LOPES, A. da S.; OLIVEIRA, G. Q. de; SOUTO FILHO, S. N.; GOES, R. J.; CAMACHO, M. A. Manejo de irrigação e nitrogênio no feijoeiro comum cultivado em sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 51-56, 2011.

MACHADO, E. C.; SCHMIDT, P. T.; MEDINA, C. L.; RIBEIRO, V. R. Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 12, p. 1161-1170, 2005.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os Coeficientes da curva de retenção de água de um

Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502, 2008.

MALUF, J. R. T.; CAIAFFO, M. R. R. Zoneamento agroclimático da cultura de feijão no Estado do Rio Grande do Sul: recomendação de períodos favoráveis de semeadura por região agroecológica. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 6., 1999, Salvador. **Resumos...** Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. p. 455-458.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação – princípios e métodos**. Viçosa: Editora UFV, 2007. 358 p.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia Vegetal: Fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. Viçosa: Editora UFV, 2005. 451 p.

MARQUES, J. D. de O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JUNIOR, O. F.; MARTINS, G. C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 38, n. 2, p. 193-206, 2008.

MAVI, H. S.; TUPPER, G. J. **Agrometeorology Principles and Applications of Climate Studies in Agriculture**. New York: Food Products Press, 2004. 364 p.

MEDLYN, B. E.; BARTON, C. V. M.; BROADMEADOW, M. S. J.; CEULEMANS, R.; ANGELIS, P. D.; FORSTREUTER, M.; FREEMAN, M.; JACKSON, S. B.; KELLOMÄKI, S.; LAITAT, E.; REY, A.; ROBERNTZ, P.; SIGURDSSON, B. D.; STRASSEMAYER, J.; WANG, K.; CURTIS, P. S.; JARVIS, P. G. Stomatal conductance of forest species after long-term exposure to elevated CO₂ concentration: a synthesis. **New Phytologist**, v. 149, p. 247-264, 2001.

MELO FILHO, J. F. de; OLIVEIRA, A. S. de; LOPES, L. da C.; VELLAME, L. M. Análise estatística exploratória e variabilidade da densidade do solo em um perfil de Latossolo amarelo coeso do tabuleiros costeiros da Bahia. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 2, p. 199-205, 2006.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Zoneamento agrícola para a cultura de feijão 3ª safra no Estado do Paraná (Portaria 461/2010). 2010. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=1397849022>>. Acesso em: 20 set. 2011.

MONTANARI, R.; PELLIN, D. M. P.; SILVA JUNIOR, C. A. da; CARVALHO, M. de P. e; GIOIA, M. T.; DALCHIAVON, F. C.; GONZÁLEZ, A. P. Correlação entre produção de feijão e atributos físicos de um Latossolo em Mato Grosso do Sul. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 6, p. 772-784, 2013.

MORISON, J. I. L. Sensitivity of stomata and water use efficiency to high CO₂. **Plant, Cell and Environment**, v. 8, p. 467-474, 1985.

MOTT, K. A. Do stomata respond to CO₂ concentration other than intercellular? **Plant Physiology**, v. 86, p. 200-203, 1988.

MOUHOUCHE, B.; RUGET, F.; DELÉCOLLE, R. Effects of water stress applied at different phenological phase on yield components of dwarf bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Agronomie**, v. 18, p. 197-205, 1998.

MOURA, E. G.; ALBUQUERQUE, J. M.; AGUIAR, A. das C. F. Growth and Productivity of Corn as Affected by Mulching and Tillage in Alley Cropping Systems. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 2, p. 204-208, 2008.

MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: I. Physical and Mineralogical Methods**. Madison: SSSA, p. 799–823, 1986.

NASCIMENTO, P. do; BASTOS, E. A.; ARAÚJO, E. C. E.; FREIRE FILHO, F. R.; SILVA E. M. da. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 853–860, 2011.

NÓBREGA, J. Q.; RAO, T. V. R.; BELTRÃO, N. E. de M.; FIDELES FILHO, J. Avaliação do efeito do estresse hídrico no rendimento do feijoeiro por sensoriamento remoto termal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 299-305, 2004.

NÓBREGA, J. Q.; TANTRAVAHU, V. R. R.; BELTRÃO, N. E. de M.; FIDELES FILHO, J. Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 437-443, 2001.

OGUNWOLE, J. O.; PIRES L.F.; SHEHU, B. M. Changes in the Structure of a Nigerian Soil under Different Land Management Practices. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Online), Viçosa, v. 39, p. 830-840, 2015.

OLIVEIRA, A. D. de; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. de J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 86-95, 2005.

OREN, R.; SPERRY, J. S.; KATUL, G. G.; PATAKI, D. E.; EWERS, B. E.; PHILLIPS, N.; SCHAFER, K. V. R. Survey and synthesis of intra- and inter specific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. **Plant, Cell and Environment**, v. 22, n. 12, p. 1515-1526, 1999.

PACHECO, A.; OLIVEIRA, G. Q. de; LOPES, A. da S.; BARBOSA, A. S. Manejos de irrigação e nitrogênio na produção de feijoeiro sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 3, p. 323-330, 2012.

PAGLIAI, M.; LA MARCA, M.; LUCAMANTE, G. Changes in soil porosity in remolded soil treated with poultry manure. **Soil Science**, v. 144, p. 128–140, 1987.

PAIVA, A. S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D.; TURCO, J. E. P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 161-169, 2005.

PATEL, N.; RAJPUT, T. B. S. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. **Agricultural Water Management**, v. 88, p. 209-223, 2007.

PAVANI, C. L.; LOPES, A. da S.; PEREIRA, G. T. Desenvolvimento da cultura do feijoeiro submetida a dois sistemas de manejo de irrigação e de cultivo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 453-459, 2009.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia – fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Ed. Agropecuária. 2002. 478 p.

PESSOA, A. C. S.; KELLING, C. R. S.; POZZEBON, E. J.; KÖNIG, O. Concentração e acumulação de nitrogênio, fósforo e potássio pelo feijoeiro cultivado em diferentes níveis de irrigação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 69-74, 1996.

PHOGAT, V. K., AYLMORES, L. A. G. Evaluation of soil structure by using computer-assisted tomography. **Australian Journal of Soil Research**, v. 27, p. 313–323, 1989.

PILLAI-MCGARRY, U. U. P.; COLLIS-GEORGE, N. Laboratory simulation of the surface morphology of self-mulching and non self mulching Vertisols. I. Materials, methods and preliminary results. **Australian Journal Soil Research**, v. 28, p. 129–139, 1990.

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédica: Edur, 1998.

PIMENTEL, C.; LAFFRAY, D.; LOUGUET, P. Intrinsic water use efficiency at the pollination stage as a parameter for drought tolerance selection in *Phaseolus vulgaris*. **Physiologia Plantarum**, v. 106, p. 184-198, 1999.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Mudanças na estrutura do solo avaliada com uso de tomografia computadorizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 4, p. 391-400, 2010.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. **Beam Interactions with Materials & Atoms**, v. 229, p. 443-456, 2005 a.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 42, p. 857–863, 2005 b.

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; ROSA, J. A.; COOPER, M.; HECK, R. J.; PASSONI, S.; ROQUE, W. L. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v. 165, p. 66-79, 2017.

PIRES, L. F.; COOPER, M.; CÁSSARO, F. A. M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; DIAS, N. M. P. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Catena**, v. 72, p. 297-304, 2008.

PIVETTA, C. R.; HELDWEIN, A. B.; MALDANER, I. C.; RADONS, S. Z.; TAZZO, I. F.; LUCAS, D. D. Evapotranspiração máxima do pimentão cultivado em estufa plástica em função de variáveis fenométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 7, p. 768–775, 2010.

QUEIROZ, J. E.; MENDONÇA; I. F. C. de; SANTOS, R. V. dos. Um estudo comparativo entre dois procedimentos de cálculo da condutividade hidráulica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, p. 113-115, 1997.

RAMOS JUNIOR, E. U.; LEMOS, L. B.; SILVA, T. R. B. Componentes da produção, produtividade de grãos e características tecnológicas de cultivares de feijão. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 1, p. 75-82, 2005.

RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances Soil Science**, v. 16, p. 213-234, 1991.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, p. 1931-1935, 2006.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. Pedologia, base para distinção de ambientes. 5 ed. Lavras: UFLA, 2007.

ROBERTSON, M. J. **Water extraction by field-grown grain sorghum. St. Lucia, Queensland. (Phd. Dissertation)** – The University of Queensland, Australia, 1991.

RODRIGUES, V. A.; FENNER, P. T.; SANSIGOLO, C. A.; MORAES, M. H. Estimativa da Água no Solo em Floresta de *Eucalyptus grandis*. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 4, p. 523-533, 2012.

SAAD, A. M.; LIBARDI, P. L. Qualidade da irrigação controlada por tensiômetros em pivô central. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, 1994.

SANTOS, O. O.; FALCÃO, H.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; LUSTOSA, B. M.; SANTOS, M. G. Desempenho ecofisiológico de milho, sorgo e braquiária sob déficit hídrico e reidratação. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 2, p. 203-212, 2014.

SARMAH, A. K.; PILLAI-MCGARRY, U.; MCGARRY, D. Repair of the structure of a compacted Vertisol via wet/dry cycles. **Soil & Tillage Research**, v. 38, p. 17-33, 1996.

SARTORI, G.; FERRARI, G. A.; PAGLIAI, M. Changes in soil porosity and surface shrinkage in a remolded, saline clay soil treated with compost. **Soil Science**, v. 139, p. 523–530, 1985.

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agronomy Journal**, v. 71, p. 921-924, 1979.

SEGAL, E., BEN-GAL, A., SHANI, U. Water availability and yield response to high-frequency micro-irrigation in sunflowers. In: Proceedings of the Sixth International Micro-irrigation Congresson 'Micro-irrigation Technology for Developing Agriculture', 2000, Cape Town. **Conference Papers...** Cape Town, 2000. p. 22–27.

SEKI, K. SWRC fit – a non linear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 4, p. 407-437, 2007.

SENTELHAS, P. C.; MONTEIRO, J. E. B de. A. **Agrometeorologia dos Cultivos - O Fator Meteorológico na Produção Agrícola**. INMET, 2009.

SEVERIANO, E. C. **Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2010, 148 f. Tese Doutorado (Agronomia) – Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, 2010.

SHIMADA, M. M.; ARF, O.; SÁ, M. E. Componentes do rendimento e desenvolvimento do feijoeiro de porte ereto sob diferentes densidades populacionais. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 181-187, 2000.

SILVA, A. C. F.; ALTHOFF, D. A.; BERTONCINI, O.; VIEIRA, S. A.; KATSURAYAMA, Y.; SOUZA, Z. S. **Sistema de produção para batata consumo e batata semente em Santa Catarina**. Florianópolis: EPAGRI, 2002. 123 p.

SILVA, A. J. P da; COELHO, E. F. Estimation of Water Percolation by Different Methods Using TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1 p. 73-81, 2004.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, n. 2, p. 91-95, 1986.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. **Indicadores da qualidade física do solo**. In: JONG van LIER, Q., ed. Física do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 241-281.

SILVA, E. C.; MANSUR, NOGUEIRA, R. J. M. C.; AZEVEDO NETO, A. D. de; BRITO, J. Z. de; CABRAL, E. L. Aspectos ecofisiológicos de dez espécies em uma área de caatinga no município de Cabaceiras, Paraíba, Brasil. **Iheringia**, Série Botânica, v. 59, n. 2, p. 201-205, 2004.

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. A New Version of The Assistat-Statistical Assistance Software. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 4., 2006, Orlando. **Anais...** Orlando: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006, p. 393-396.

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. Comparison of means of agricultural experimentation data through different tests using the software Assistat. v. 11, n. 37, p. 3527-3531, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016.11523.

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7., 2009, Orlando. **Proceedings...** Reno: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009. 1CD-ROM.

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. The ASSISTAT Software: statistical assistance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 6., 1996, Cancun. **Anais...** Cancun: American Society of Agricultural Engineers, 1996, p. 294-298.

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 71-78, 2002.

SILVA, L. C.; FIDELES FILHO, J.; BELTRÃO, E. M.; RAMANA RAO, T. V. Variação diurna da resistência estomática à difusão de vapor de água em amendoim irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 3, p. 269-76, 1998.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000.

SILVEIRA, P. M. da; SILVA, J. H. da; LOBO JUNIOR, M.; CUNHA, P. C. R. da. Atributos do solo e produtividade do milho e do feijoeiro irrigado sob sistema integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1170-1175, 2011.

SIVAKUMAR, M. V. K.; GOMMES, R.; BAIER, W. Agrometeorology and sustainable agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, n. 1, p. 11-26, 2000.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Efeitos de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 835-841, 2000.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Resposta do feijoeiro ao nitrogênio em cobertura sob diferentes lâminas de irrigação e preparos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 473-481, 2001.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação. Goiânia: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, 1995. 49 p.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeito do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 83-91, 1999

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. de. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

SZILGYI, L. Influence of drought on seed yield components in common bean. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, Special Issue, p. 320-330, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TATAGIBA, S. D; NASCIMENTO, K. J. T; MORAES, G. A. B. K; PELOSO, A. de F. Crescimento e rendimento produtivo do feijoeiro submetido à restrição hídrica. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 21, n. 5, p. 465-475, 2013.

TENHUNEN, J.; ROUPSARD, O. RAMBAL, S. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean ever green sites: revision of current hypotheses? **Global Change Biology**, v. 8, p. 999–1017, 2002.

TIAN, F.; QIU, G.; YANG, Y.; LÜ, Y.; XIONG, Y. Estimation of evapotranspiration and its partition based on an extended three-temperature model and MODIS products. **Journal of Hydrology**, v. 498, p. 210-220, 2013.

TOGNON, A. A. Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo. 1991, 85 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz – USP, Piracicaba, 1991.

Van GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VASQUÉZ, M. A. N.; FOLEGATTI, M. V.; DIAS, N. S.; SILVA, C. R. da. Efeito do ambiente protegido cultivado com melão sobre os elementos meteorológicos e sua relação com as condições externas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 137-143, 2005.

VIEIRA, H. J.; BERGAMASCHI, H.; ANGELOCCI, L. R.; LIBARDI, P. L. Comportamento de duas variedades de feijoeiro sob dois regimes de disponibilidade hídrica no solo. II. Resistência estomática à difusão de vapor, densidade de fluxo transpiratório e potenciais da água na planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 9, p. 1045-1053, 1989.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 4, p. 242-246, 1966.

WANG, F. X.; KANG, Y.; LIU, S. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 79, p. 248-264, 2006.

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v. 108, p. 57-74, 1982.

YAN, H.; WANG, S. Q.; BILLESBACH, D.; OECHEL, W.; ZHANG, J. H.; MEYERS, T. MARTIN, T. A.; MATAMALA, R., BALDICCHI, D.; BOHRER, G.; DRAGONI, D.; SCOTT, R. Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 581-595, 2012.

YAO, R. J.; YANG, J. S.; WU, D. H.; LI, F. R.; GAO, P.; WANG, X. P. Evaluation of pedo-transfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity in coastal salt-affected mud farmland. **Journal Soils Sediments**, v. 15, p. 902–916, 2015.

ZHANG, L.; WU, P.; ZHU, D. Hydraulic design procedure for drip irrigation submain unit based on relative flow difference. **Irrigation Science**, v. 31, p. 1065-1073, 2013.

ZHAO, H.; XIAO, G. J.; WANG, R. Y. Impact of climate change on spring wheat growth in semiarid rain feed region. **Advanced Earth Science**, v. 22 n. 3, p. 322–327, 2007.

ZILIO, M.; COELHO, C. M. M.; SOUZA, C. A.; SANTOS, J. C. P.; MIQUELLUTI, D. J. Contribuição dos componentes de rendimento na produtividade de genótipos crioulos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 429-438, 2011.